Vergleichende akustische Untersuchungen

Abgeschlossen: November 1930

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
genehmigt von der Philosophischen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Berlin

von

Hans Winkhaus
aus Hohensalza

Tag der Promotion: 20. November 1930

Tag der mündlichen Prüfung: 27. November 1930

Dr. Emil Ebering, Berlin SW 68, Ritterstr. 77/78.

P 85

Berichterstatter: Prof. Dr. v. Hornbostel
Prof. Dr. Wehnelt

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Einleitung.

Vorliegende Untersuchung behandelt in ihrem ersten Teil die Analysen der Klänge des Oboe-Orgelregisters. In einem zweiten Teil werden dann die gefundenen Klangstrukturen mit denen des Oboe-Orchesterinstruments verglichen. Teil III enthält die Resultate entsprechender Untersuchungen der Flöten-, Klarinetten- und Fagottorgelklänge an Hand einiger Kurven- und Analysenbeispiele. Daraus ergeben sich erstmalig für den Orgelbau exakte akustische Unterlagen für die Verbesserung der betreffenden Registerstimmen.

Die Firmen W. Sauer (Inh. Dr. phil. h. c. Oscar Walcker), Frankfurt a. d. Oder, und Johannes Klais, Bonn a. Rh., haben Herrn Geheimrat Stumpf bzw. mir in liebenswürdiger Weise Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt, und zwar handelt es sich bei den untersuchten Registern um solche, die als besonders hervorragend von den Orgelbauern bezeichnet werden.

Teil I.

Analysen der Oboe-Orgelregisterstimmen.

Methoden.

Es kamen die Interferenzmethode und die oszillographische Methode unter Benutzung eines Niederfrequenz-Kondensatormikrophons zur Anwendung:

Interferenzmethode.[1]

Der zu untersuchende Klang wird durch eine Röhrenleitung zum Ohr geleitet. Zieht man den Stempel einer der an der Hauptleitung angebrachten Seitenröhren auf ein Viertel der Wellenlänge eines bestimmten Tones heraus, so ist dieser Ton am Beobachtungsende der Hauptleitung nicht zu hören. Diese durch die Umweglänge bedingte Vernichtung von Sinustönen ist bei Stumpf so ausführlich beschrieben, daß ein näheres Eingehen auf die Apparatur hier überflüssig ist.[2]

Jedoch wurde auf Vorschlag von E. Schumann an Stelle des von Stumpf benutzten Systems eine andere Einrichtung getroffen:

Sämtliche Messingröhren (auch die Hauptleitung) wurden durch solche aus Glas ersetzt. In die nach unten hängenden

Seitenröhren läßt man von unten her Wasser eintreten und kann so die akustisch wirksame Länge der Seitenröhre beliebig verringern. Die ausziehbaren Metallstempel werden also durch eine Wassersäule ersetzt. Über die hierher gehörigen Versuche und die Vorteile, die ein derartig dichter Abschluß der Seitenröhren gegenüber den bisherigen Einrichtungen hinsichtlich der Interferenzwirkungen bietet, wird K. Krüger in einer besonderen Arbeit „Über akustische Interferenzsysteme" berichten.

Die oszillographische Methode.

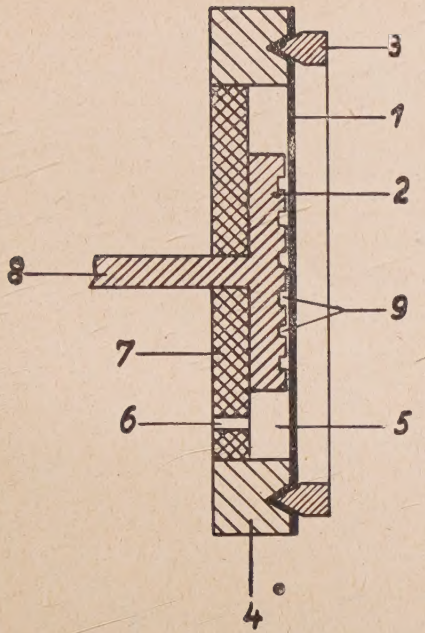
Obgleich das Interferenzverfahren bei der Festlegung der klangbestimmenden Elemente die entscheidende Rolle spielt, lassen sich — vorausgesetzt, daß die Interferenzmethode nur harmonische Partialtöne liefert, und deshalb die Anwendung des Fourierverfahrens berechtigt erscheint — mit Hilfe der objektiven Verfahren manche Verschiebungen der Intensitätsverhältnisse eines Klanges doch überzeugender darstellen; und dies besonders dann, wenn in starken Klängen diejenigen Teiltöne ihre Intensität geändert haben, deren Isolierung am Interferenzapparat nicht möglich ist.

Erstmalig wurde bei der angewandten oszillographischen Methode ein eichbares Niederfrequenz-Kondensatormikrophon nach C. Wente[3] verwendet, technisch besonders in bezug auf die Eichbarkeit — von Grützmacher (eine Veröffentlichung darüber hat Dr. Grützmacher — Reichspostzentralamt — in Vorbereitung) und E. Meyer verbessert.

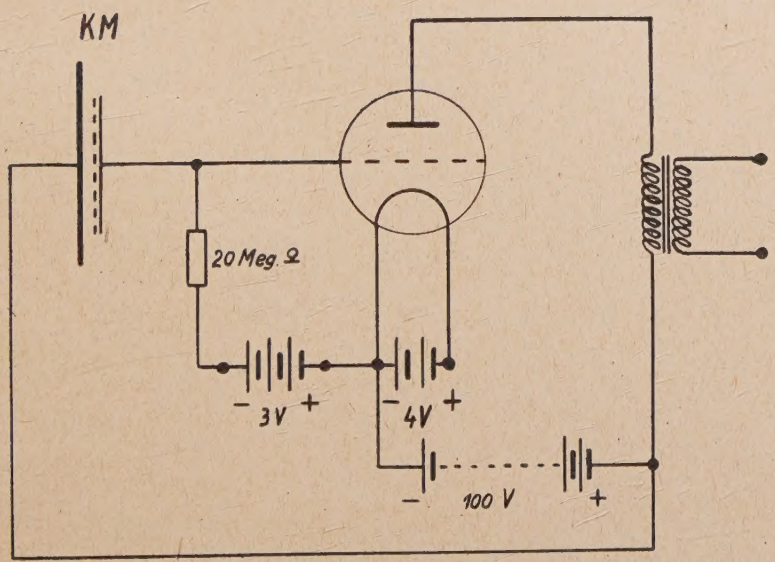
Dieses rauschfreie Kondensatormikrophon in Niederfrequenzschaltung ist — wie die Eichung ergab — im akustischen Bereich praktisch frequenzunabhängig, nicht übersteuerbar und besitzt praktisch keine Reizschwelle.

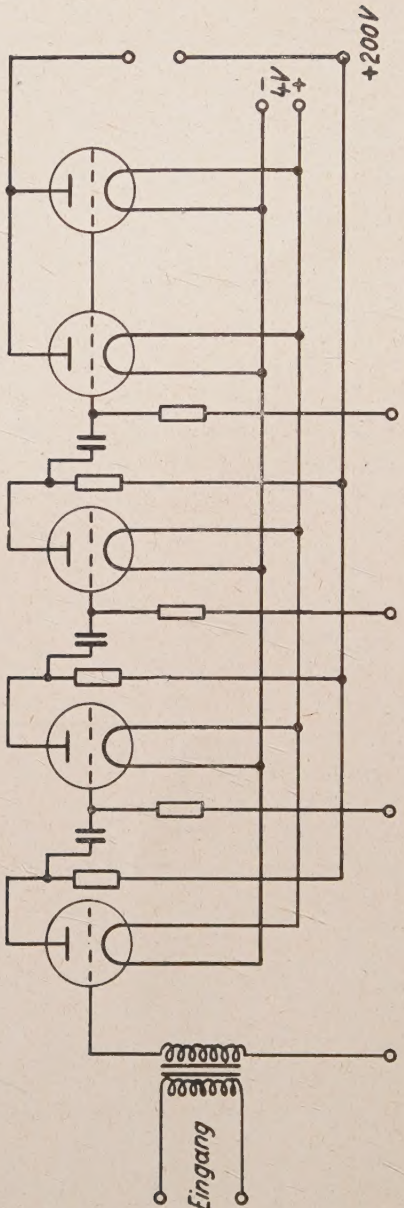
Gegenüber dem Hochfrequenz-Kondensatormikrophon zeichnet sich das Kondensatormikrophon in Niederfrequenzschaltung durch einfache Handhabung aus (Fortfall der Abstimmung des Schwingkreises und Wartung des Gleichrichterrohres). Bei der Schaltung wurde ein Rohr mit einem Durchgriff von mindestens 6 % gewählt.

Anschließend wurde eine dreifache Spannungsverstärkung und eine Leistungsendstufe (Widerstand-Kapazitätskopplung) verwendet, die Endstufe mit einer unverzerrten Leistung von



1 Membran (Stärke 0,02 mm)
2 Gegenelektrode
3 Spannring
4 Körper
5 Luftraum
6 Ausführungsgang
7 Hartgummiplatte
8 Anschluß
9 Luftpolster





Verstärker

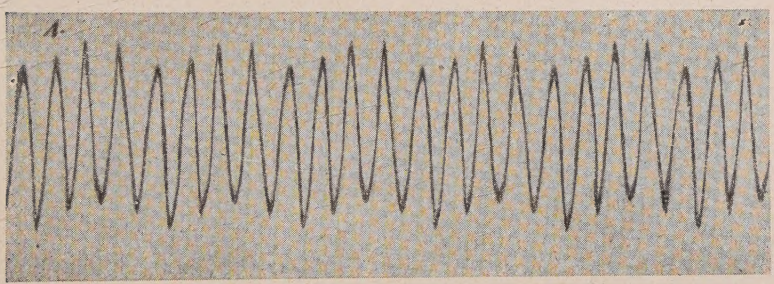
etwa 0,5 Watt. (Schaltungsbild des Verstärkers siehe Seite 6).

Die registrierten Kurven wurden unter Verwendung einer sehr hoch abgestimmten Schleife (Type II) mit einem dreischleifigen Siemens-Oszillographen registriert und der Fourieranalyse unterworfen (Mader'scher Analysator, vergl. Geiger und Scheel, Handb. d. Phys. Band 8, S. 23, Berlin 1927). Zur besseren Übersicht sind in Teil II die Amplituden graphisch in Partialtongerüsten dargestellt.

Analysen.[4]

e_1: beim Abbau tritt mit der Auslöschung von gis_3 eine merkbare Schädigung der der Orgelstimme eigentümlichen Farbe ein; wird auch der 4. Teilton weggenommen, so bleibt nur noch ein schwacher, an ein leises A erinnernder Klangrest übrig. Kommen nur die Teiltöne der vier- und fünfgestrichenen Oktave in Fortfall, so verliert das Klangprodukt zwar an Schärfe, aber der Klangcharakter erfährt keine einschneidende Wandlung.

Ebenso zeigt das Kurvenbild (Kurve 1) keine nennenswerten

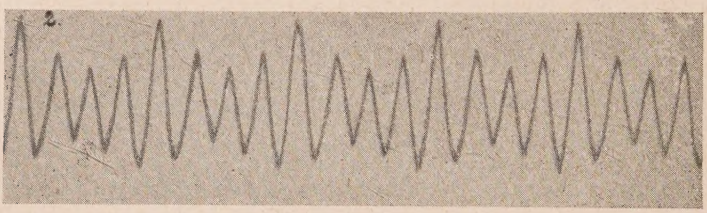


Fourieranalyse Kurve 1
(Amplitudenwerte in Prozenten der Maximalamplitude)

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	
Ampl.	0,04	0,05	0,20	1,00	0,24	0,04	
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12	
Ampl.	0,11	0,06	0,08	0,03	0,02	0,06	
P.T. Nr.	13	14	15	16	17	18	19
Ampl.	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01

Amplitudenwerte für die vier- und fünfgestrichene Oktave, nur die das absolute Maximum einkleidenden Teiltöne, von denen sich der obere bei den Interferenzversuchen neben dem Maximum als charakteristisch erwies, treten mehr hervor.

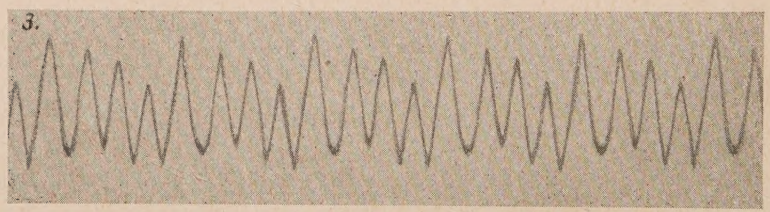
f_1 und fis_1: Die Interferenzversuche und Analysen dieser Klänge Forte-f_1 (Kurve 2)



Fourieranalyse Kurve 2

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Ampl.	0,14	0,10	0,40	1,00	0,14	0,08	0,06
P.T. Nr.	8	9	10	11	12	13	14
Ampl.	0,09	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01

und Forte-fis_1 (Kurve 3):

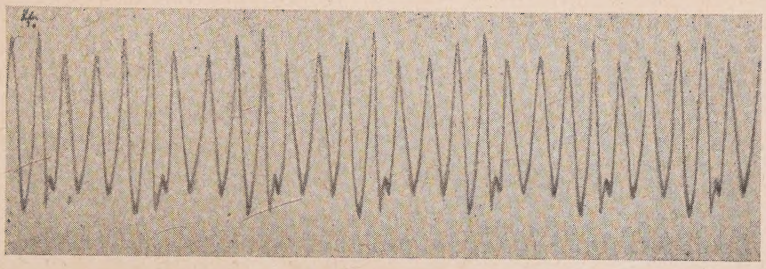


Fourieranalyse Kurve 3

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,21	0,38	0,44	1,00	0,34	0,09	0,10	0,09
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,04	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03

liefern ähnliche Ergebnisse.

fis_1 im ff (Kurve 4) dagegen, in dem eine Spur der charakteristischen Färbung eines natürlichen Oboeklanges schon für das bloße Ohr enthalten war,



Fourieranalyse Kurve 4

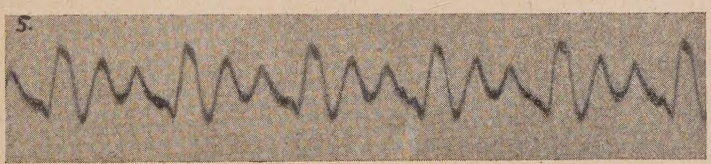
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,03	0,04	0,14	1,00	0,31	0,06	0,04	0,15
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,19	0,10	0,02	0,05	0,04	0,03	0,01	0,03

zeigt eine verstärkte Teiltongruppe in der Mitte und am Ende der viergestrichenen Oktave.

Beim Abbau dieses der Kurve 4 entsprechenden Klanges durch Interferenz geht die Spur des Typischen bei Auslöschung des 9. und 8. Teiltones, beginnend schon mit dem Fortfallen von ais_4, verloren.

Die Fis_1-Stimme war eine der wenigen Orgel-Oboestimmen, deren Klänge bei unwissentlichen Versuchen als oboeähnlich beurteilt wurden; dies aber nur im ff.

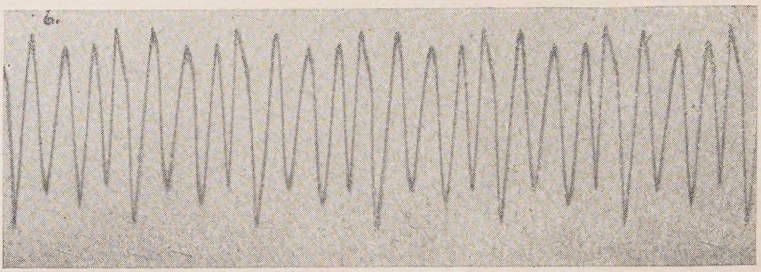
g_1: büßt erst durch Einstellung der Interferenzröhren auf h_3 seine Eigentümlichkeit ein. Die Forte-Kurve 5



Fourieranalyse Kurve 5

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,16	0,38	1,00	0,57	0,22	0,08	0,04	0,09
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,06	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,01

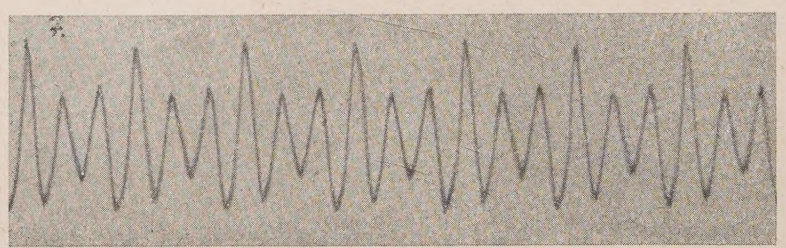
wie die ff-Kurve 6 ergeben nur im Gebiet der dreigestrichenen Oktave starke Klangteile.



Fourieranalyse Kurve 6

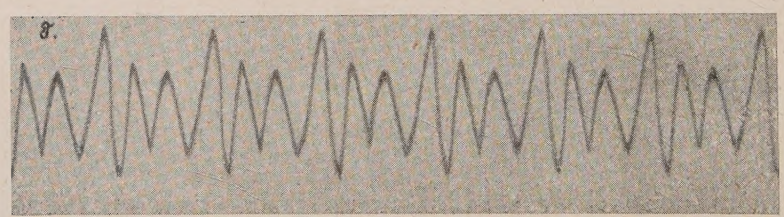
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,02	0,19	0,36	1,00	0,25	0,16	0,09	0,10
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,11	0,10	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03

a_1: hier ist die Maximalamplitude, wie die Analysen eines mf- (7), Forte- (8) und ff-Klanges (9) erkennen lassen, stets auf dem 3. Teilton zu finden. Beim Abbau durch Interferenz stört erst die Auslöschung von a_3.



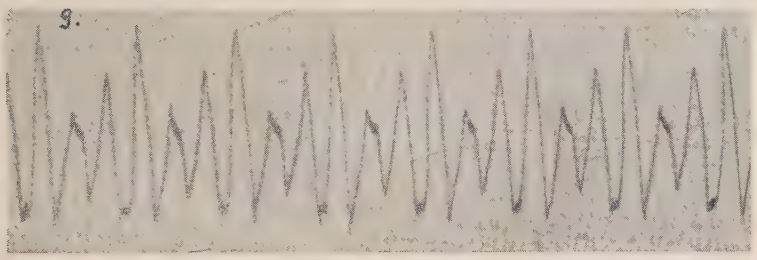
Fourieranalyse Kurve 7

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,07	0,28	1,00	0,16	0,08	0,11
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01



Fourieranalyse Kurve 8

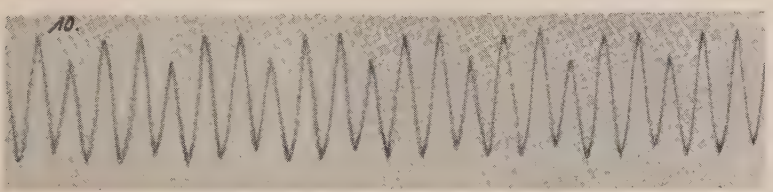
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,07	0,52	1,00	0,49	0,09	0,05
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,04	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01



Fourieranalyse Kurve 9

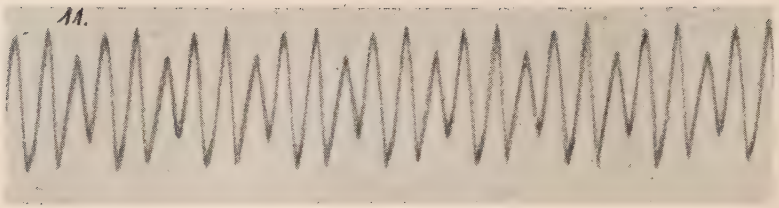
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,06	0,30	1,00	0,21	0,12	0,07
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,10	0,06	0,13	0,03	0,04	0,02

h_1: Die Interferenzversuche mit den den Kurven 10, 11 und 12 entsprechenden Klängen (p, mf, f^+) ergaben bei Ausfall der Glieder in der viergestrichenen Oktave schwache Beeinträchtigungen des Klangeindrucks. Besonders deutlich beim mf-Klang, der dem Oboecharakter ziemlich nahe kommt. Die Kurven liefern folgende Amplitudenwerte:



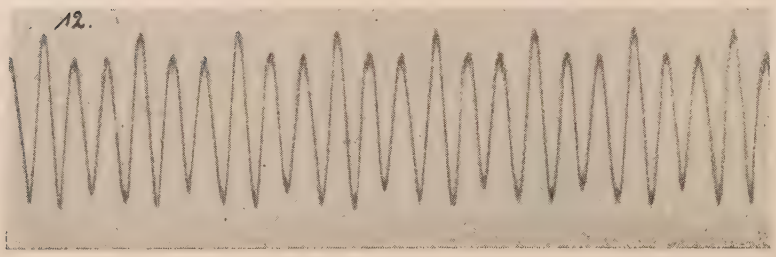
Fourieranalyse Kurve 10

P.T. Nr.	1	2	3	4	5
Ampl.	0,14	0,21	1,00	0,06	0,08
P.T. Nr.	6	7	8	9	
Ampl.	0,08	0,03	0,02	0,01	



Fourieranalyse Kurve 11

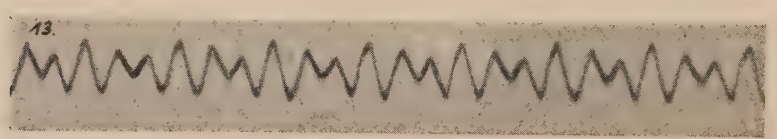
P.T. Nr.	1	2	3	4	5
Ampl.	0,10	0,25	1,00	0	0,14
P.T. Nr.	6	7	8	9	10
Ampl.	0,14	0,01	0,05	0,02	0,01



Fourieranalyse Kurve 12

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,07	0,13	1,00	0,11	0,03	0,15
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,06	0,02	0,04	0,03	0,01	0

c_2: Die Analysen des p-, mf- und f^+-Klanges (Kurve 13, 14, 15) enthalten wieder keine nennenswerten Teiltöne in der Formantzone II; entscheidend für die Färbung dieser an einen Oboeklang wenig erinnernden Klänge ist stets g_3.

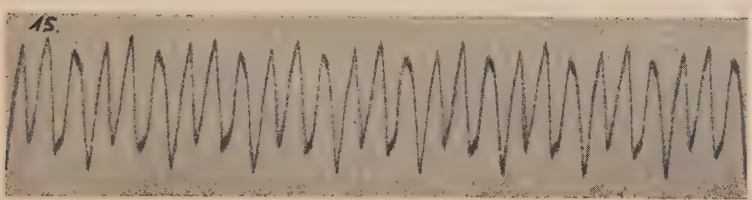


Fourieranalyse Kurve 13

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,15	0,59	1,09	0,06	0,06	0,09
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,03	0,03	0,08	0,06	0,04	0,03

Fourieranalyse Kurve 14

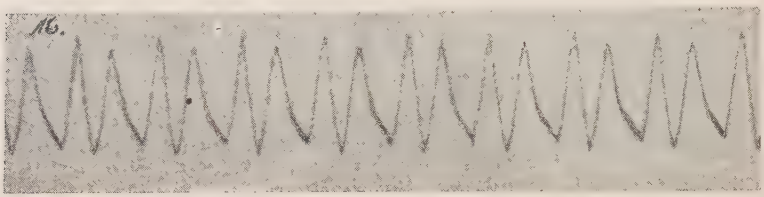
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,04	0,06	1,00	0,07	0,06	0,07
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,04	0,03	0,05	0,02	0,01	0,03



Fourieranalyse Kurve 15

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,18	0,21	1,00	0,09	0,04	0,08
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,15	0,04	0,08	0,01	0,01	0,01

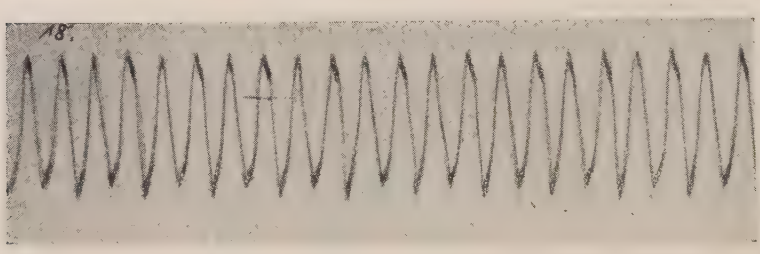
d_2: enthält als Maximum den 2. Teilton, ergibt oberhalb a_3 keine nennenswerten Amplituden.



Fourieranalyse Kurve 16

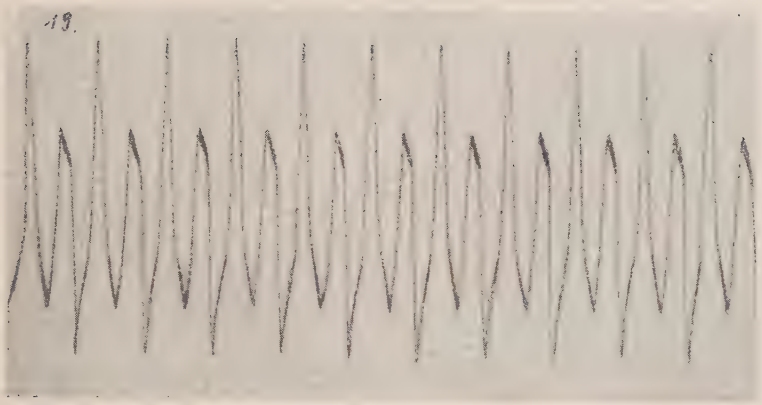
P.T. Nr.	1	2	3	4	5
Ampl.	0,21	1,00	0,48	0,06	0,05
P.T. Nr.	6	7	8	9	10
Ampl.	0,01	0,05	0,01	0,02	0,03

e_2: Hier erscheint in mf (18) und f^+ (19) in der Mitte der viergestrichenen Oktave ein Nebenmaximum, das sich bei Stichversuchen neben dem absoluten Maximum als wesentlich herausstellt.



Fourieranalyse Kurve 18

P.T. Nr.	1	2	3	4	5
Ampl.	0,02	1,00	0,07	0,16	0,06
P.T. Nr.	6	7	8	9	10
Ampl.	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01



Fourieranalyse Kurve 19

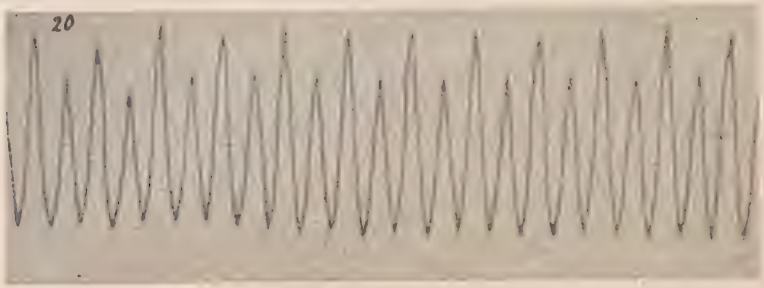
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Ampl.	0,11	1,00	0,07	0,26	0,20	0,05	0,17
P.T. Nr.	8	9	10	11	12	13	
Ampl.	0,04	0,07	0,04	0,05	0,05	0,01	

Im p (17) dagegen wird die Färbung nur durch e_3 bestimmt.

Fourieranalyse Kurve 17

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,03	1,00	0,10	0,06	0,09	0,03	0,01	0,01

f_2: (Klangbilder 21, p und 20, forte) liefert entsprechende Resultate. Das Nebenmaximum bei f_4 ist nur im Forte-Klang vorhanden und mit ausschlaggebend für die Klangfarbe.



Fourieranalyse Kurve 20

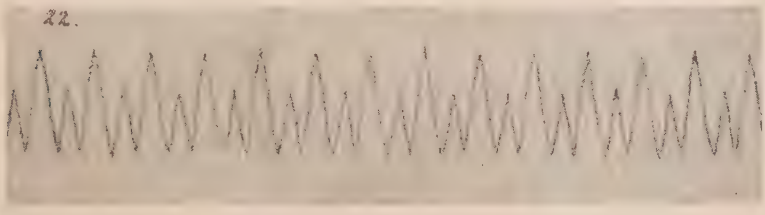
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,22	1,00	0,06	0,09	0,01	0,02	0,01	0,01

Fourieranalyse Kurve 21

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,03	1,00	0,03	0,17	0,03	0,03	0,02	0,04

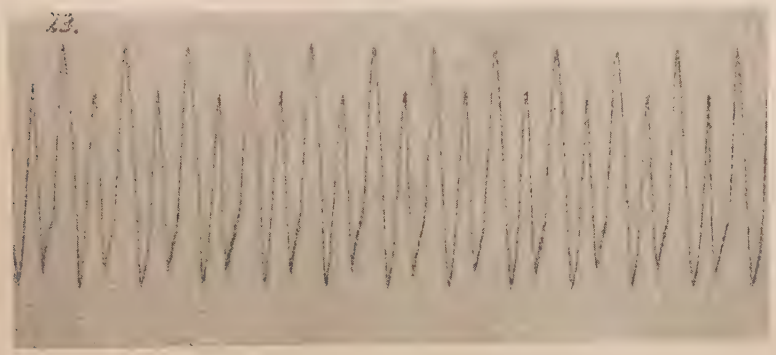
g_2: Alle Stärkegrade 22 (p), 23 (mf) und 24 (f^+) haben etwa die gleiche Struktur, nur im f^+ hebt sich d_5 etwas heraus.

Wesentliche Klangänderungen treten beim Abbau im p mit Ausfall von d_4, im mf und Forte$^+$ durch Wegnahme von g_4 ein.



Fourieranalyse Kurve 22

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,74	1,00	0,27	0,09	0,06	0,03	0,03	0,04



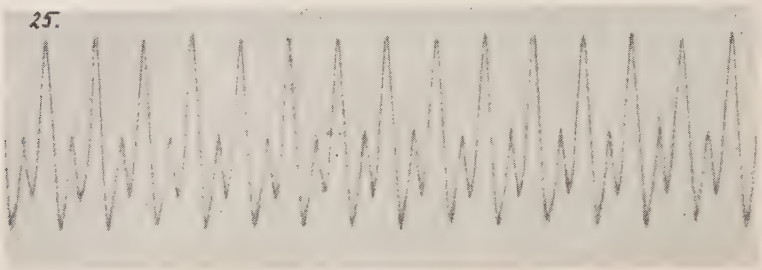
Fourieranalyse Kurve 23

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,38	1,00	0,27	0,18	0,10	0,05	0,06	0,01

Fourieranalyse Kurve 24

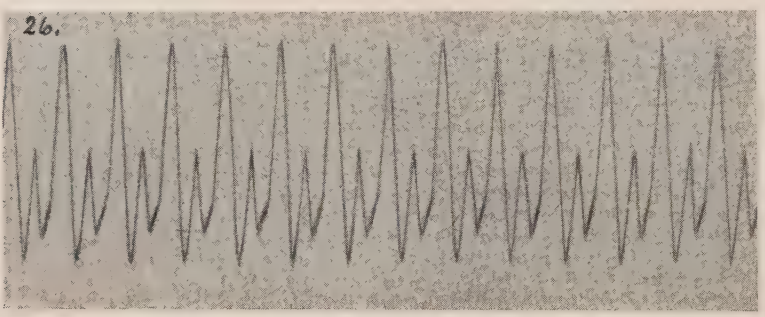
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,70	1,00	0,35	0,10	0,09	0,15	0,03	0,01

a_2: Im p (25) und forte (26) sind Grundton und 1. Oberton führend, mit Ausnahme der in 26 etwas stärkeren Duodezime, sonst keine nennenswerten Abweichungen.



Fourieranalyse Kurve 25

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,95	1,00	0,10	0,11	0,07	0,02



Fouriernalyse Kurve 26

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	0,94	1,00	0,27	0,17	0,06	0,04

Teil II.

Abweichungen der Strukturen der untersuchten Oboe-Orgelklänge von den entsprechenden Klängen des Oboe-Instruments.

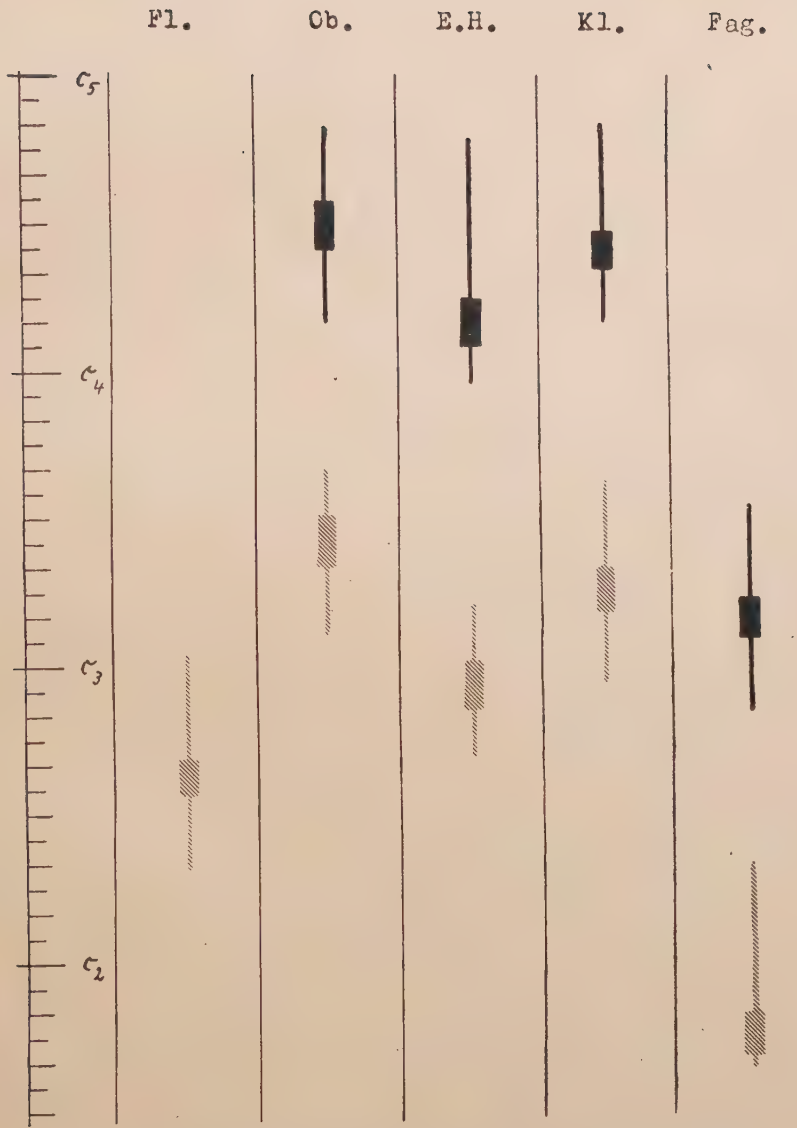
Die Helmholtz'sche Relativtheorie[1] für Instrumentalklänge hat einer exakten Nachprüfung nicht standgehalten. In neuerer Zeit hat E. Schumann[2] mit Hilfe der von Stumpf[3] benutzten subjektiven Methoden (resonierende Gabeln, Interferenz, Synthese) und einer objektiven Methode (Kondensatormikrophon in Hochfrequenzschaltung und Oszillograph) die Absoluttheorie auch für die instrumentalen Klangfarben einwandfrei bestätigt und darüber hinaus auf Grund systematischer Versuchsreihen grundlegende Gesetze zur Physik der Klangfarben aufgestellt.

Die Resultate der Untersuchung Schumanns lassen sich, soweit es sich um die Holzblasinstrumente handelt, wie folgt zusammenfassen:

Die instrumentalen Klänge weisen innerhalb der Partialtonreihe an absolute Höhen gebundene Verstärkungsgebiete auf, die — entsprechend den Bezeichnungen in den Sprachlauteuntersuchungen Stumpfs — als Formantstrecken bezeichnet werden (das dynamische Zentrum dieser die Klangfärbung bestimmenden Formantstrecken wird Formantzentrum genannt).

Nachstehend seien die Formantstrecken und Formantzentren für die Holzblasinstrumente angegeben. (Die tiefere Formantzone wird mit I, die höhere mit II bezeichnet. Die Grenzen der Formanten sind nach den Verstärkungsgebieten, wie sie sich aus den oszillographischen Aufnahmen ergeben haben, bestimmt):

	Formanten		Zentren
Flöte	$e_2 — g_3$		$g_2 — gis_2$
Oboe	$cis_3 — as_3$	(Formant I)	f_3
	$d_4 — b_4$	(Formant II)	fis_4
Engl. Horn . . .	$g_2 — e_3$	(Formant I)	b_2
	$b_3 — b_4$	(Formant II)	d_4
Klarinette . . .	$b_2 — g_3$	(Formant I)	es_3
	$d_4 — b_4$	(Formant II)	f_4
Fagott	$g_1 — e_2$	(Formant I)	a_1
	$b_2 — fis_3$	(Formant II)	d_3

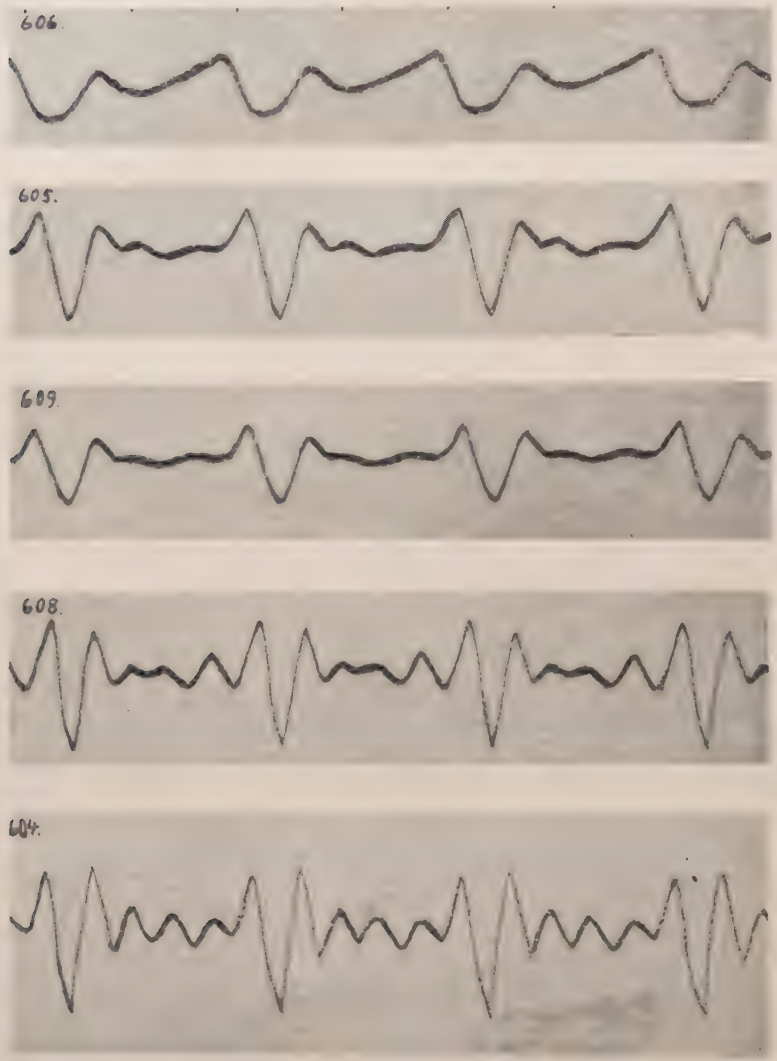


Die Intensitätsverteilungskurve weist bei Klängen mit 2 Formanten zwischen den Formantgebieten stets ein Tal, eine mit nur schwachen Teiltönen besetzte Zone, oft auch eine Lücke auf.

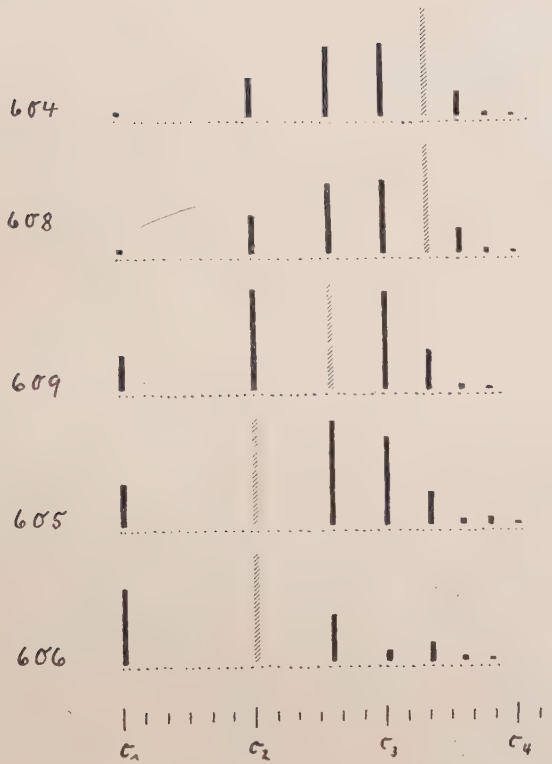
Mit zunehmender Stärke des Gesamtklanges rückt das absolute Maximum auf Teiltöne von höherer Ordnungszahl (Verschiebungsgesetz).

Beispiel:

Kurven und Fourieranalysen von c_1-Klängen der Flöte[4] 606 (p), 605 (mf), 609 (mf*), 608 (f*) und 604 (ff):



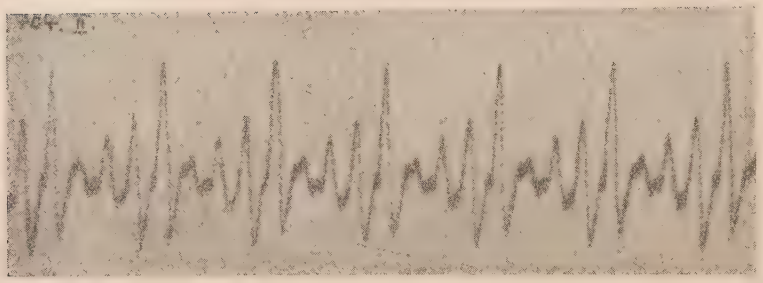
(Amplitudenwerte in Prozenten der [schaffiert gezeichneten] größten Partialtonamplitude)

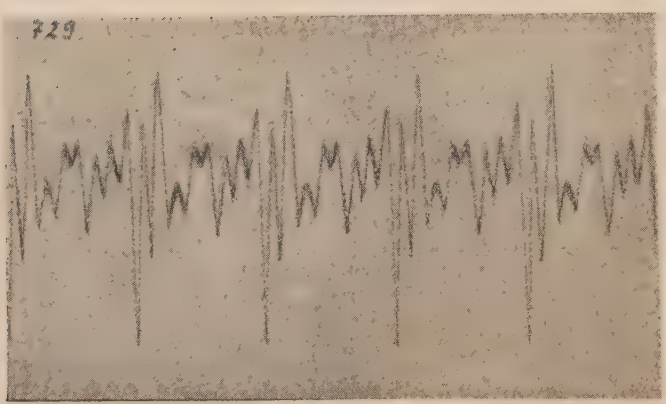


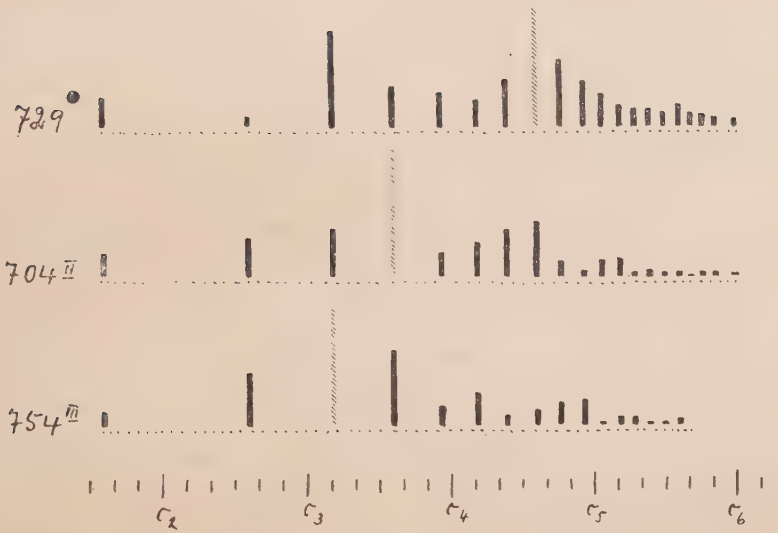
Für Klänge mit 2 Formanten gilt:

Liegt das absolute Maximum im tieferen Formanten, so steigt es mit zunehmender Stärke des Klanges zunächst auf höhere Klangteile innerhalb der Formantstrecke, um dann bei Erreichen der oberen Grenze dieses Formanten bei weiterer Steigerung der Klangstärke auf einen Partialton der nächst höheren Formantregion zu springen (Schumannsches Sprunggesetz).

Beispiel:
Kurven und Fourieranalysen der g_1-Oboeklänge[5] 754 III (p), 704 II (mf) und 729 (ff^+):



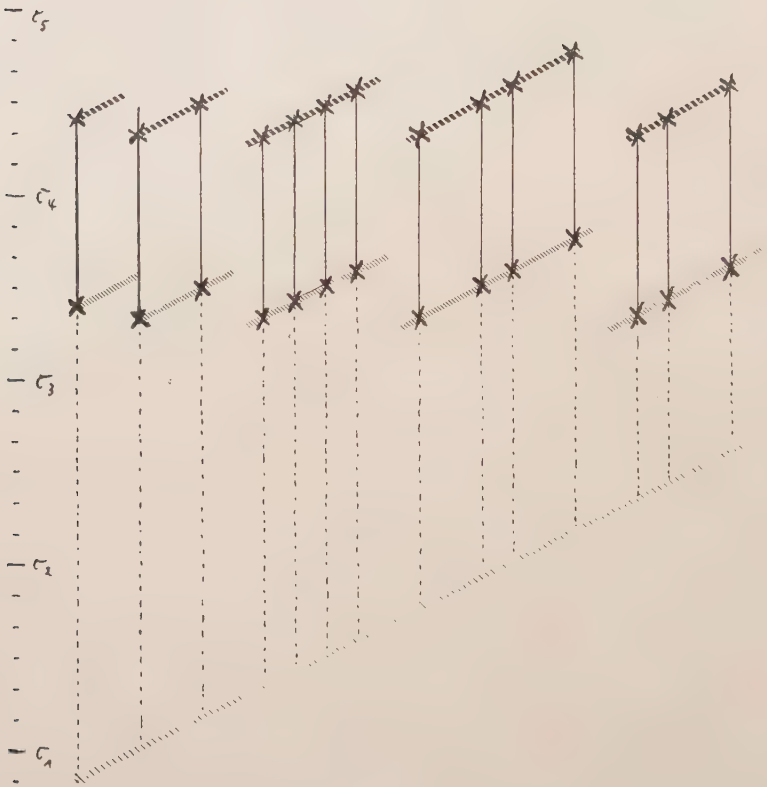




Sofern nur die Bedingung erfüllt ist, daß der stärkste Teilton — in Klängen mit 2 Formanten — innerhalb einer Formantstrecke liegt und auch die Teiltöne (bzw. ein Teilton) der anderen Formantstrecke gut ausgebildet sind, ist der Klang in allen Stärkegraden als der desselben Instruments erkennbar. So kann z. B. in einem c_1-Klang der Flöte (vergl. die Kurven und Analysen S. 22) der 2., 3., 4. und sogar der 5. Partialton stärkster Teil sein. Die typische Flöten-Klangfarbe eines und desselben Instruments ist also nicht davon abhängig, daß ein Teilton von bestimmter Ordnungszahl immer das Maximum aufweist oder daß mehrere Teiltöne mit immer denselben Ordnungszahlen stärkste Klangbestandteile sind.

Behält man die Stärke des Klanges bei, so steigen mit höher werdendem Grundton die stärksten Teiltöne innerhalb der Formantstrecken, und zwar „bleibt das Maximum innerhalb jeder Formantregion in der Regel so lange auf einem Partialton bestimmter Ordnungszahl, bis dieser die obere Grenze der Region erreicht hat. Dann rückt das Maximum stets auf einen in der betreffenden Formantregion schon befindlichen bzw. gerade von unten her eintretenden Partial-

ton niederer Ordnungszahl, um auf diesem innerhalb der Formantregion entsprechend dem Grundton wieder zu steigen".



Dünn markiert im Grundton.
Stärkerer Partialton im Formantgebiet I.
Stärkerer Partialton im Formantgebiet II.

Unabhängig von der Grundtonhöhe hat das Maximum in der Formantregion I zum Maximum in der Formantregion II bei typischen Klängen eines Instruments immer ein festes, für dieses Instrument charakteristisches Schwingungszahlenverhältnis (Schumannsches Formantenintervallgesetz).

Zum Beispiel verhält sich die Schwingungszahl des stärksten Teiltones im Formanten I zum stärksten Teilton im Formanten II bei der Oboe stets wie 1 : 2. Vergl. die von Schumann dazu mitgeteilte nachstehende Aufstellung und nebenstehende Skizze.

Kurve	Stärkster P.T. im Formantgeb. I	Stärkster P.T. im Formantgeb. II	Schwingungszahlenverhält.
b_0 702	6.	13. (12.)	annähernd 1 : 2
c_1 712	5.	11.	annähernd 1 : 2
714	5.	10.	1 : 2
701 II	5.	10.	1 : 2
d_1 718	5.	10.	1 : 2
702 II	5.	10.	1 : 2
e_1 720	4.	8.	1 : 2
f_1 726	4.	9. (8.)	annähernd 1 : 2
760 III	4.	9.	annähernd 1 : 2

Kurve	Stärkster P.T. im Formantgeb. I	Stärkster P.T. im Formantgeb. II	Schwingungszahlenverhält.
752 III	4.	8.	1 : 2
fis_1 727	4.	8.	1 : 2
776 III	4.	8.	1 : 2
g_1 704 II	4.	8.	1 : 2
754 III	3.	6.	1 : 2
gis_1 778 III	4.	8.	1 : 2
a_1 731	3.	6.	1 : 2
h_1 777 b	3.	6.	1 : 2
758 III	3.	6.	1 : 2
746 IV	3.	6.	1 : 2
c_2 735	3.	6.	1 : 2
738	3.	6.	1 : 2
737	3.	6.	1 : 2
d_2 727 III	3.	6.	1 : 2
e_2 778 b	2.	4.	1 : 2
f_2 760	2.	4.	1 : 2
758	2.	4.	1 : 2
g_2 779 b	2.	4.	1 : 2
711 II	2.	4.	1 : 2
gis_2 731 III	2.	4.	1 : 2

Nachstehend die Formantenintervalle für die Holzblasinstrumente Oboe, Engl. Horn und Fagott:

Instrument	n_{max_1} / n_{max_2}
Oboe	1 : 2
Engl. Horn	2 : 5
Fagott	3 : 8

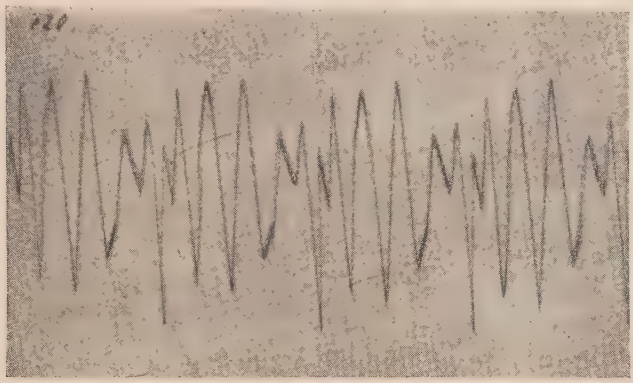
Die Flöte hat — wie schon aus der Übersichtstabelle der Formantstrecken ersichtlich — nur einen Formanten.

Die Klarinette weist kein festes Formantenintervall auf, unterscheidet doch schon die Praxis wegen der Uneinheitlichkeit der Klänge verschiedener Höhenlagen das Schalmei-, Mittel-, Klarinetten- und das höchste Register. Die Formantstrecken mit ihren Zentren es_3 und f_4 stehen etwa um eine Oktave auseinander und decken sich etwa mit denen der Oboe. Danach müßte, wenn die hohle Unterlage fortfällt, d. h. wenn der Grundton so weit gestiegen ist, daß der 2. Partialton bei d_3 liegt,[6] die Klarinette oboeähnliche Klänge liefern oder mindestens müßten derartige Klänge bei Abschneidung der äußeren Klangmerkmale kaum als solche der Klarinette zu erkennen sein. Dies ist auch der Fall; die Klänge werden in diesen Lagen oft mit denen anderer Instrumente — besonders der Oboe — verwechselt. Typisch für die Klangfarbe der Klarinette ist eben neben dem Vorhandensein starker Partialtöne in den beiden Formantzonen h_2—g_3 und d_4—b_4 die hohle Unterlage, bedingt durch starke ungradzahlige Partialtöne und das Zurücktreten bzw. den Ausfall geradzahliger Partialtöne.

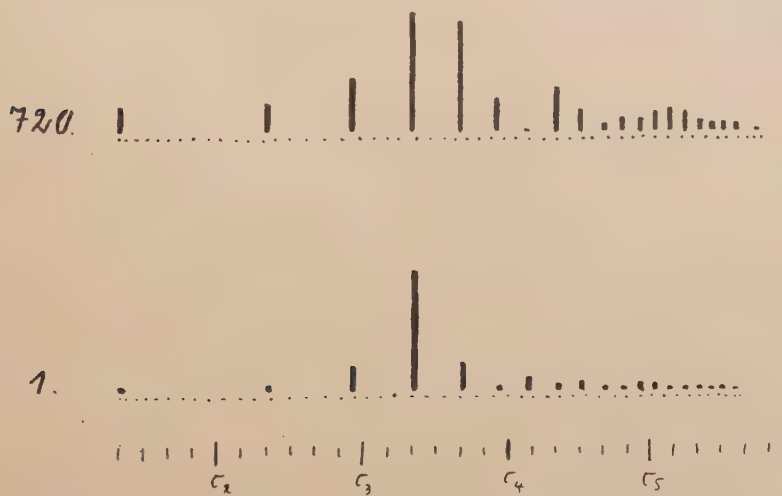
Verschiebungs- und Sprunggesetz bestätigen sich bei den Klarinettenklängen mit der Einschränkung, daß beim Rücken des Maximums die ungeradzahligen Partialtöne unterhalb dis_3 übersprungen werden.

In welcher Hinsicht nun die Klänge der untersuchten Orgelstimmen — verglichen mit den von E. Schumann untersuchten Klängen der entsprechenden Orchesterinstrumente — Mängel aufweisen, soll zunächst durch Gegenüberstellung und Besprechung der einzelnen Kurven und Fourieranalysen aufgewiesen werden.

Während die Analyse eines typischen Original-Oboeklanges auf e_1 (Kurve 720) gegenüber der untersuchten gleichstarken

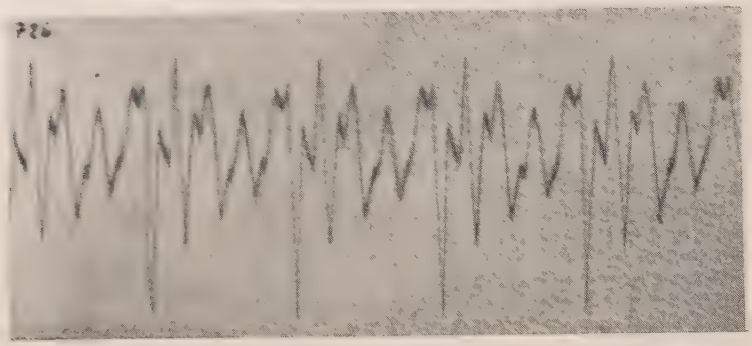


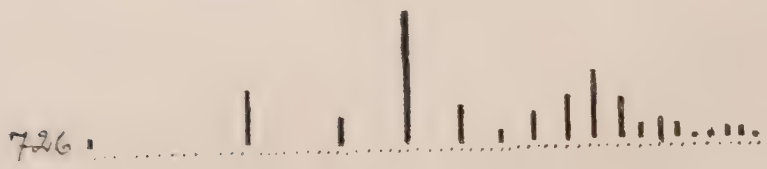
(forte) Orgelstimme e_1 (1) zunächst eine bessere Ausbildung der entsprechenden Teiltöne des Formanten I (e_3, gis_3) erkennen läßt, weisen die Strukturen — wie die zusammengestellten Amplitudenskalen zeigen — besonders in der vier- und fünfgestrichenen Oktave größte Unterschiede auf: In Kurve 1 sind die in Oboeklängen sonst starken Teiltöne der Formantregion II nur schwach angedeutet.

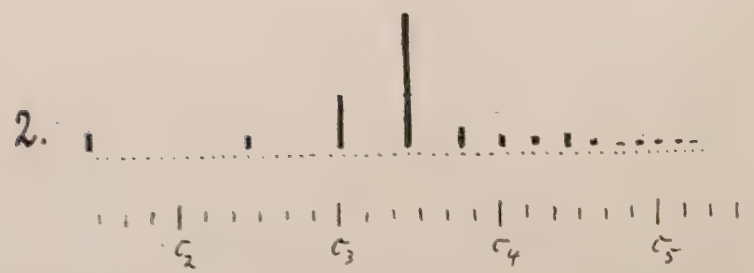


Während ferner beim Abbau der e_1-Orgelstimme durch Interferenz erst mit Auslöschung von gis_3 eine Klangwandlung eintritt, wird der Oboeklang auf e_1 schon durch die Wegnahme von gis_2 und fis_2 stark alteriert und ist bei Fortfall von e_2 als Oboeklang nicht zu erkennen.

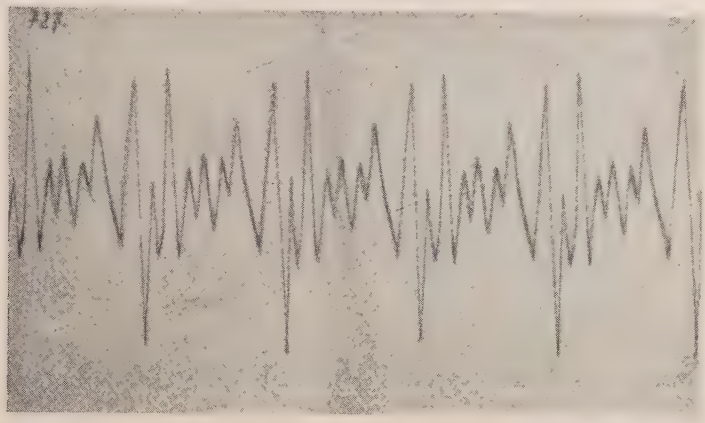
Die Aufnahmen der Orgel-Oboestimmen f_1 (Kurve 2) und fis_1 (Kurven 3 und 4) zeigen gegenüber den entsprechenden Klangkurven des Oboeinstruments — f_1 (726) und fis_1 (727) — etwa dieselben Abweichungen, wie sie beim e_1-Klang besprochen

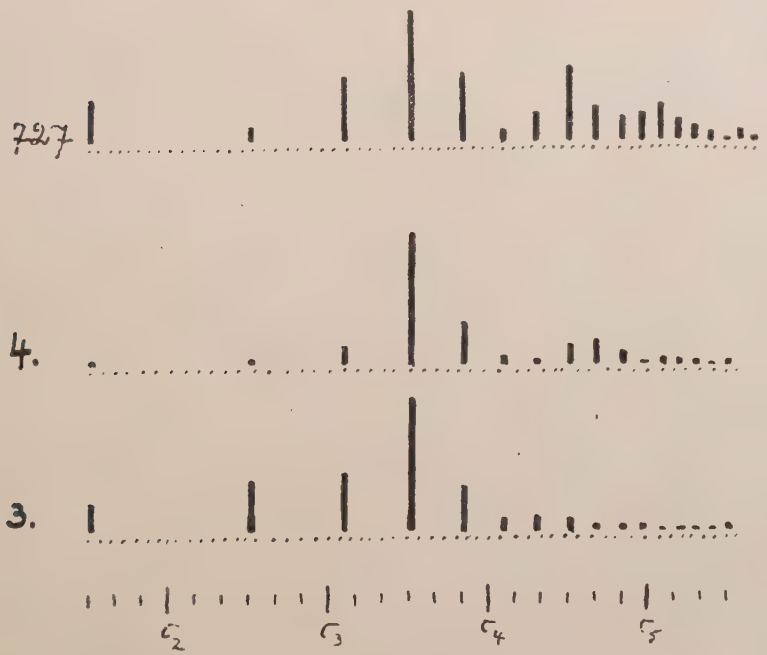






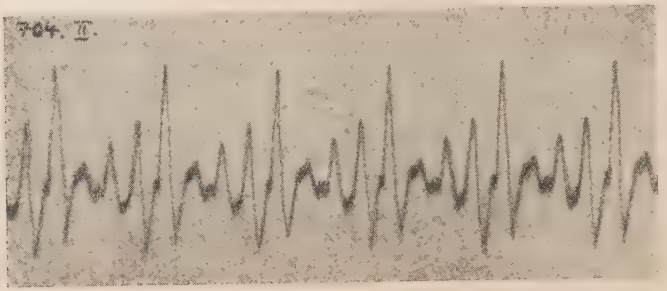
wurden. Der 4. Partialton (f_4 bzw. fis_4) ist wieder führend, in Kurve 2 und 3 bleibt aber die in den Original-Oboeklängen stark vertretene Gruppe (f_4, g_4, a_4 bzw. fis_4, gis_4, ais_4) im Gebiet des Formanten II zurück.

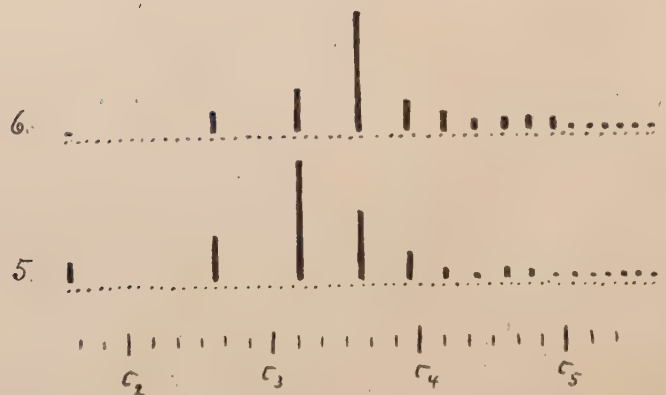




Nur Kurve 4, das Klangbild eines ff-Klanges, zeigt die Teiltöne in der Formantzone II mit etwas größeren Amplituden. Dieser Klang wirkt denn auch — wie schon Seite 9 erwähnt — oboeähnlich.

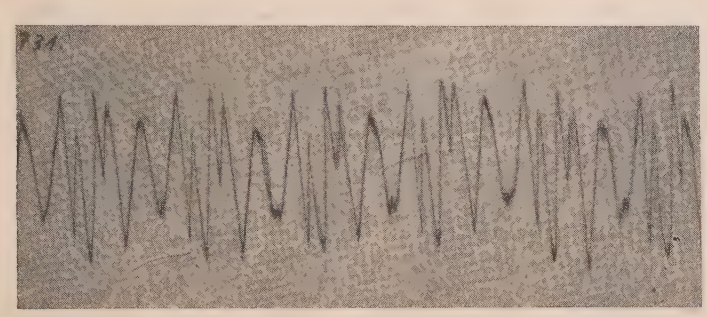
Beim Vergleich der g_1-Orgelstimmenkurvenforte (5) und ff (6) — mit der Analyse des Oboeklanges g_1 (704 II) — fällt wiederum das Fehlen des oberen Verstärkungsgebietes in den Orgelstimmen auf. Wenn auch die Analyse des ff-Klanges (6)

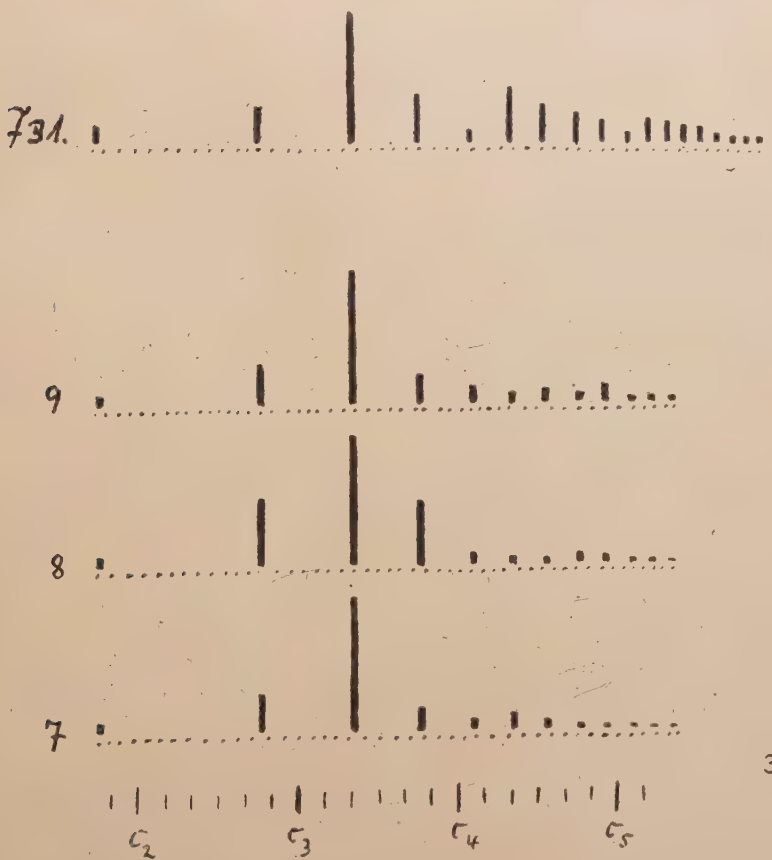




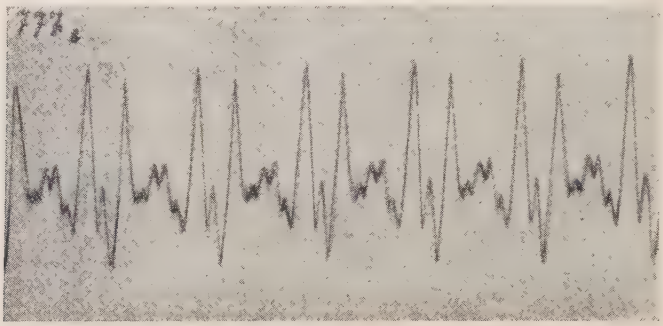
ein schwaches Ansteigen der Amplituden im Gebiet des Formanten II zeigt, so ist doch die für den Oboecharakter wesentliche Lücke zwischen den beiden Formantgebieten nicht vorhanden.

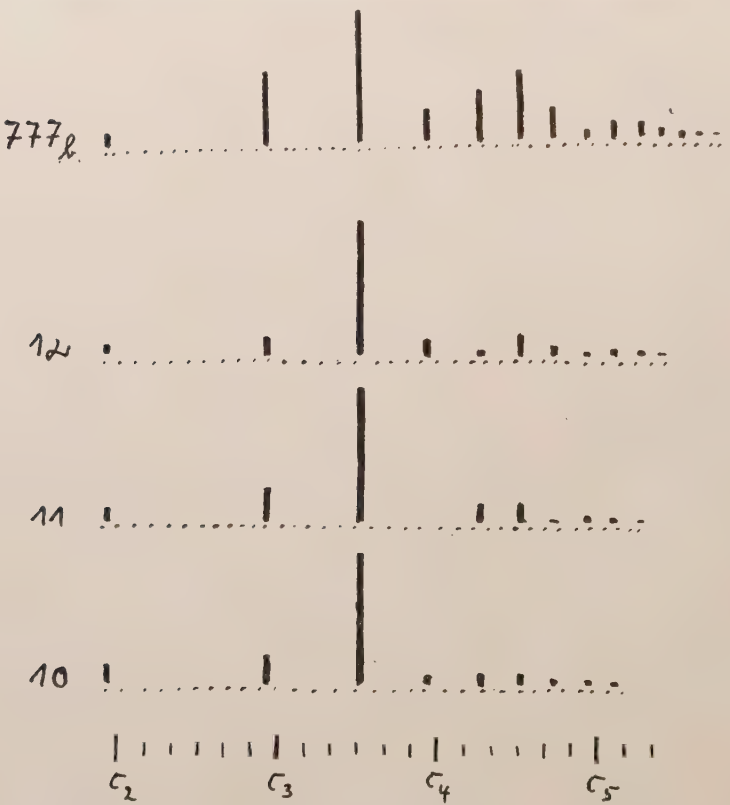
Gleiches ist bei Gegenüberstellung der Kurvenanalysen 7, 8 und 9 mit einem typischen a_1-Oboeklang (731) erkennbar.





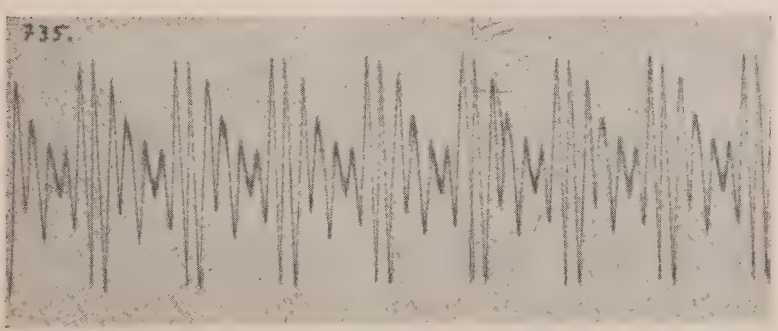
Von den untersuchten Orgelstimmen auf h_1 (10, 11, 12) ähnelt nur die Struktur des Klangbildes 11 einigermaßen der des Originalklanges (777 b), wenn auch in diesem die Zone um



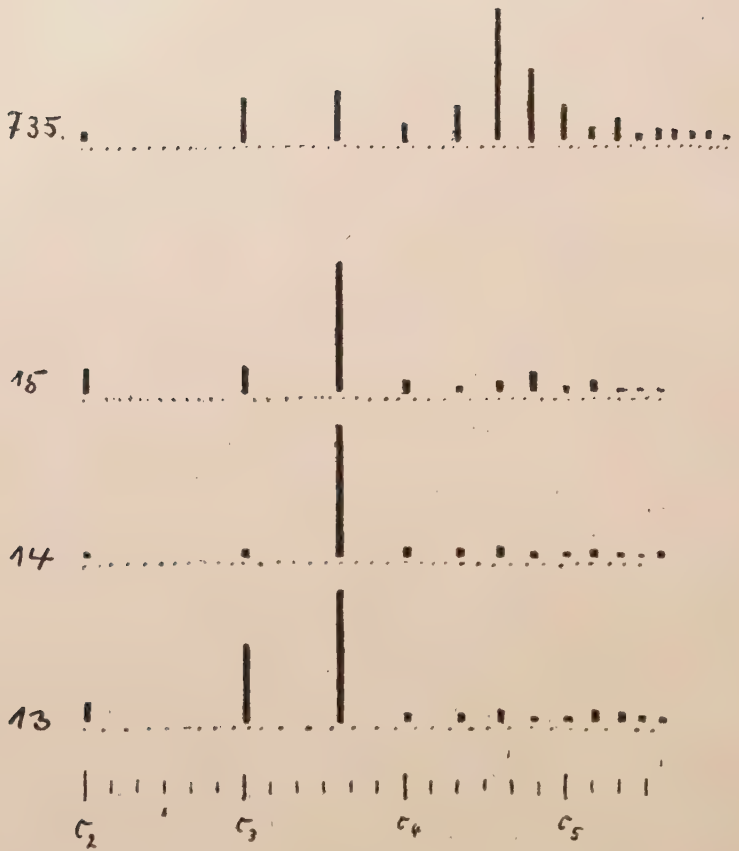


fis_4 viel stärkere Amplitudenwerte enthält. Jedoch ist für 11 der völlige Ausfall des 4. Teiltones bedeutungsvoll. Auch wurden (durch Interferenzversuche) gerade bei dem der Kurve 11 entsprechenden mf-Klang die beim Abbau des Original-Oboeklanges bemerkten Beeinträchtigungen (abgesehen von dem 3. Verstärkungsgebiet oberhalb c_5 in 777 b) bei den gleichen Interferenzeinstellungen beobachtet.

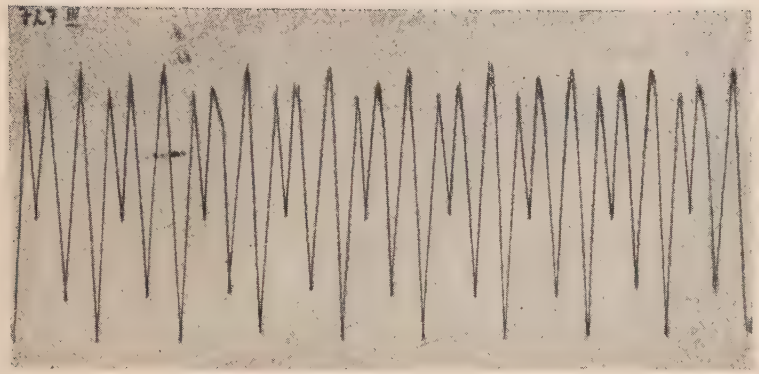
Wenig gemein haben die c_2-Klänge des Oboeinstruments mit den entsprechenden Orgelstimmen (13, 14, 15; p, mf, f^+). Während in den Oboeklängen nur im pp, höchstens im p, das absolute Maximum in der Zone des Formanten I zu finden ist, liefern dieses die Kurven 13, 14, 15 stets im Formanten I. Die in einem typischen c_2-Oboeklang (735) starke Teiltongruppe um g_4 herum ist in 13, 14 und 15 nicht ausgebildet. War in diesen Klängen g_3 bestimmend und machte sich die Auslöschung bis

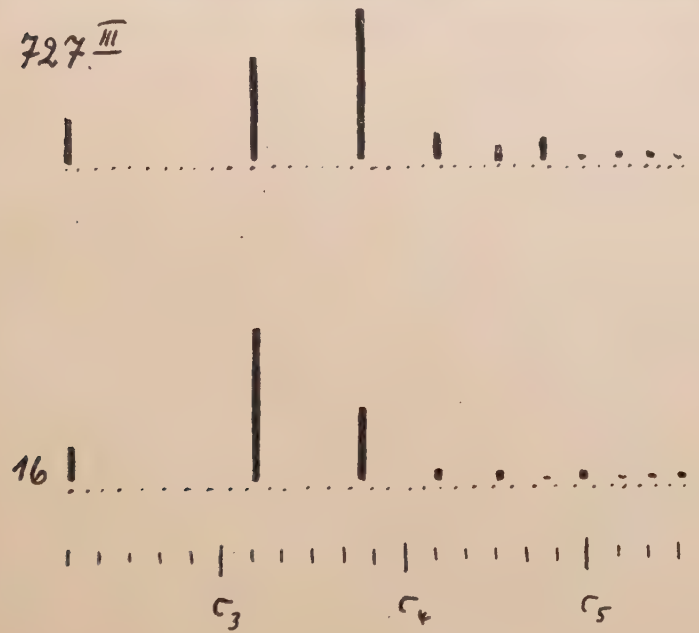


c_4 hinunter kaum bemerkbar, so traten beim Abtragen der entsprechenden Oboeklänge schon mit dem Ausfall von b_4 und ganz besonders von g_4 einschneidende Klangwandlungen ein.

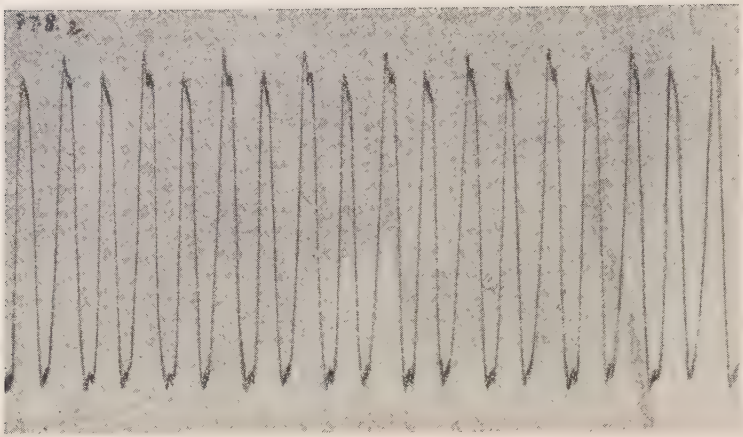


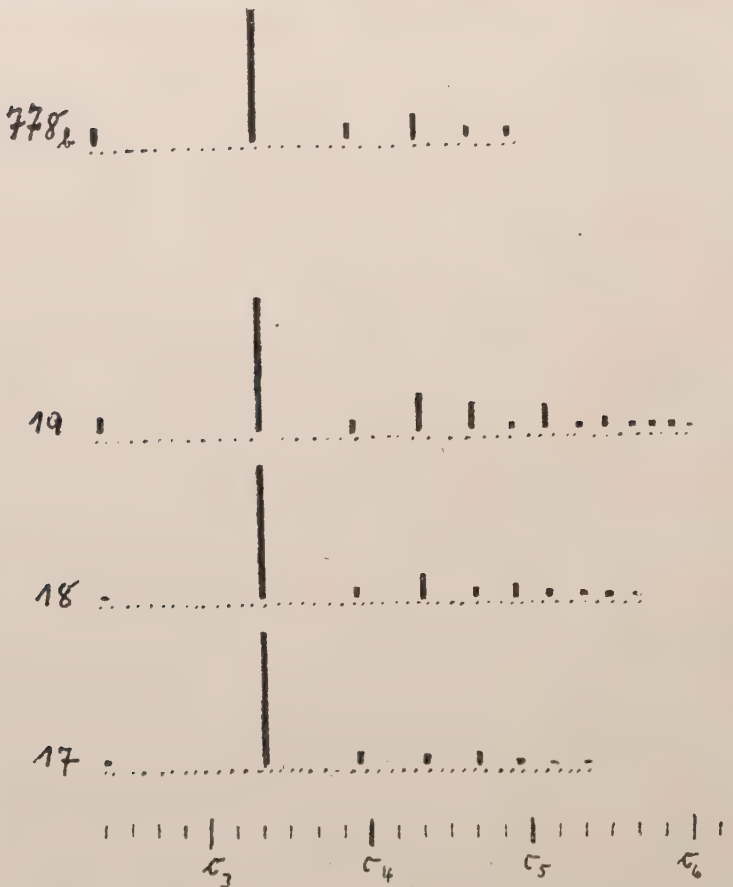
Sehr große Abweichungen voneinander ergibt auch der Vergleich der d_2-Klänge (Oboe 727 III; entsprechende Orgelstimme Klangbild 16):



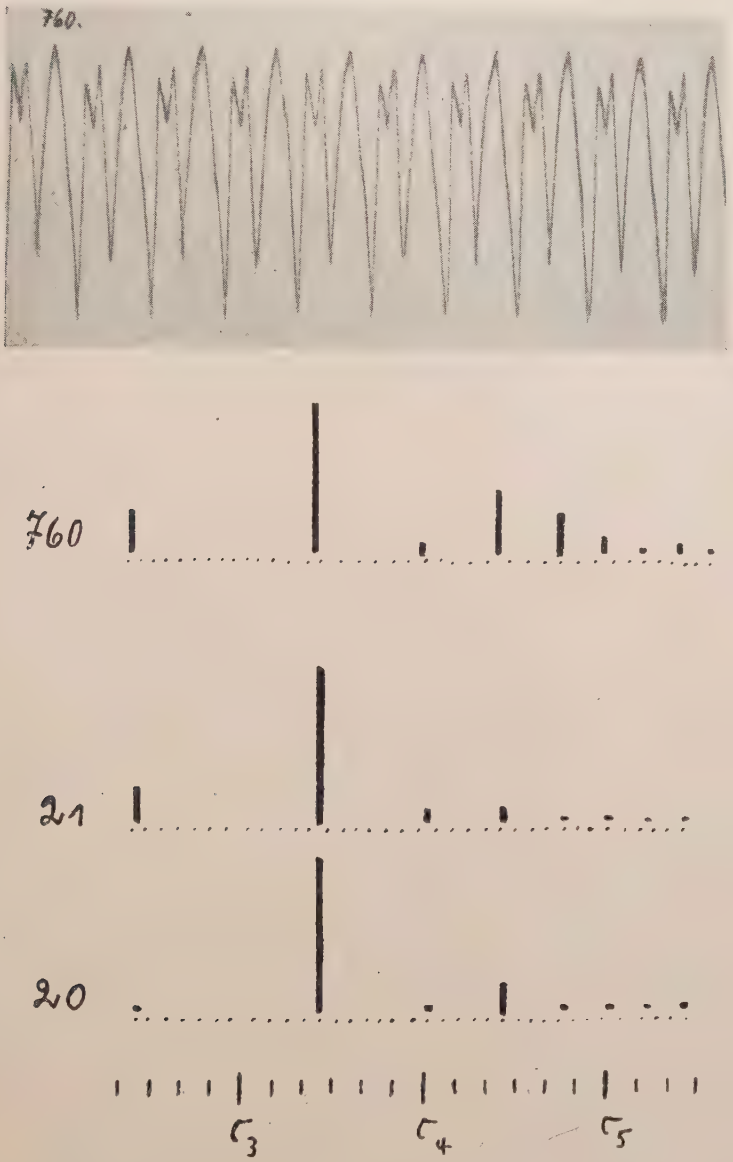


Eine sehr gute Übereinstimmung dagegen zeigen die e_2-Klänge. Hier wird sogar der Originalklang (778 b) an Charakteristik von dem der Forte$^+$-Orgelstimme (19) übertroffen. Auch die der Kurve 18 entspechende mf-Orgelstimme stimmt bemerkenswert gut mit dem Original-Oboeklang überein. Nur der p-Klang (17) läßt bedeutende Abweichungen erkennen, nämlich:

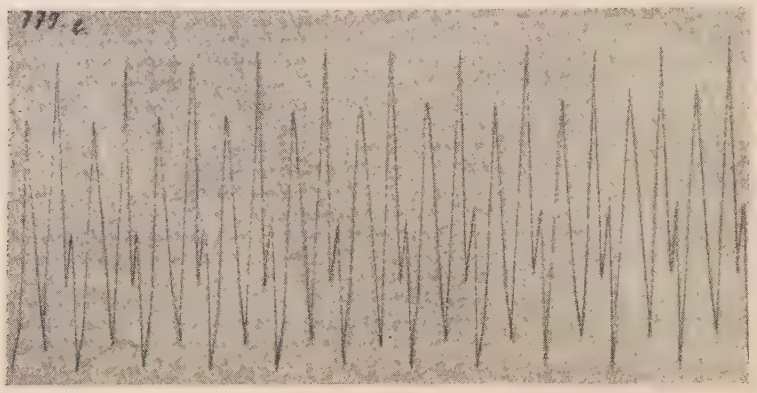


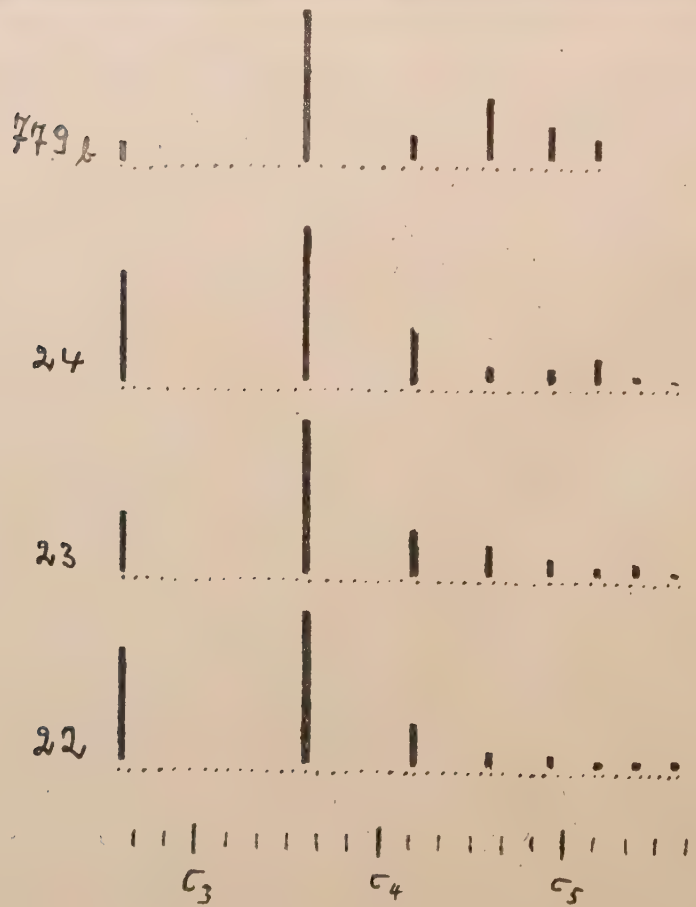

778₂
19
18
17
τ3
τ4
τ5
τ6

Ebenso ähnelt die Orgelstimme auf f_2 im Forte (20) dem entsprechenden Oboeklang (760), im p dagegen (21) zeigt sich wieder eine nur schwache Andeutung des Formanten II.

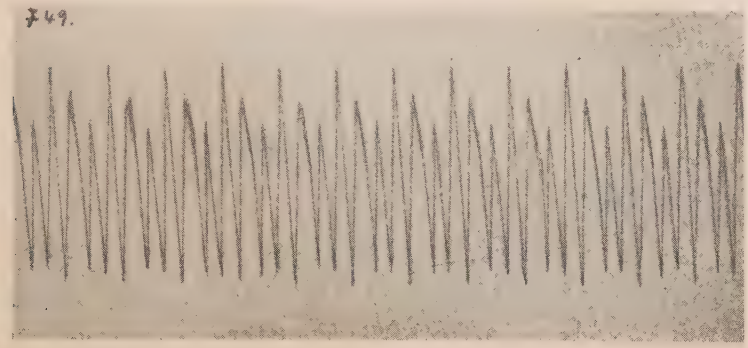


In einer der registrierten g_2-Orgelstimmen (22, 23, 24) ist der wesentliche 4. Partialton — wie in der Analyse des g_2 der Oboe (779 b) — neben dem 2. Teilton stark betont.





Noch stärkere Abweichungen ergibt der Vergleich der Klangbilder des a_2. Während im Oboeklang (749) der 3. Teilton von



entscheidender Wirkung ist, tritt er im p- (25) und f-Klang (26) der entsprechenden Orgelstimmen hinter den in diesen dominierenden beiden ersten Teiltönen stark zurück.

Zusammenfassung.

Die Untersuchung der Oboestimmen der Orgel und der Vergleich mit den Klängen des Oboeinstruments ergibt, daß in der Regel nur die Partialtöne in der Zone des Formanten I gut ausgebildet sind, die Partialtongruppen im Formantgebiet II aber viel zu schwach sind. Falls Verstärkungsgebiete oberhalb der Formantzone I vorhanden sind, so liegen sie entweder nicht in der neben dem Formanten I für die Färbung des Oboeklanges entscheidenden Gegend d_4 bis b_4 oder die Intensitätsverteilungskurve weist zwischen den Verstärkungsgebieten das Tal nicht in der Gegend a_3—cis_4 auf.

Teil III.

Resultate entsprechender Untersuchungen der Flöten-, Klarinetten- und Fagott-Orgelklänge.

Mit den in Teil I und II zur Anwendung gebrachten Methoden wurde der Vergleich der Klänge eines Flöten-, Klarinetten- und Fagott-Orgelinstruments mit den von E. Schumann untersuchten Klängen der entsprechenden Orchesterinstrumente durchgeführt.

Für die Flöte ergab sich folgendes:

Alle Klänge, deren Grundtöne nicht oberhalb der Formantstrecke liegen, weisen in allen Stärkegraden bei dem untersuchten Register der Firma Sauer keine wesentlichen Abweichungen gegenüber den Strukturen der Originalflötenklänge auf. Auch beim subjektiven Vergleich sind Unterschiede in den angegebenen Tonlagen nicht festzustellen. (Die Orgelbauer neigen sogar dazu, die Klänge des Orgelregisters denen des Flöteninstruments vorzuziehen.[1])

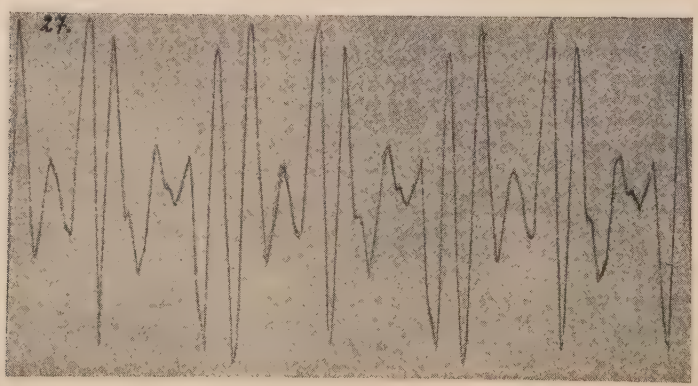
Es erübrigt sich deshalb, die Kurven, wie in Teil II für die Oboe durchgeführt, hier gegenüberzustellen. Nur sei bemerkt, daß der für die Klänge der großen Flöte so typische[2] A-Charakter bei den Orgelklängen des genannten Tonbereiches nicht so stark ausgeprägt ist. Dies mag seinen Grund darin haben, daß sich die Mensur bei den Orgelflöten mit jeder Grundtonhöhe ändert, während der Resonanzkörper bei dem Orchesterinstrument gleich bleibt. Freilich verändern sich die Mensuren der Resonanzkörper der Oboe-, Klarinetten- und Fagottregister ebenfalls mit der Tonhöhe, aber bei Instrumenten mit harter Zunge hat der Resonanzkörper nicht so entscheidende Funktionen für die Tonbildung wie bei den Labialpfeifen. Ein weiterer Grund für die gute Übereinstimmung von Orgel- und Orchesterstimme bei der Flöte ist dadurch gegeben, daß der Anblasevorgang bei den Labialpfeifen der Orgel dem bei der Flöte geübten gleich zu setzen ist. Denn in beiden Fällen haben wir es mit einer um

eine Schneide pendelnden Luftlamelle zu tun; der Anzahl der Bänder, in die diese Luftlamelle je nach dem Anblasedruck, der Ausströmungsöffnung und der Maulweite zerfällt, entspricht die in dem betreffenden Klang enthaltene Zahl der Partialtöne. Der Schneide des Oberlabiums bei der Lippenpfeife entspricht ja bei der Flöte der den anblasenden Lippen des Bläsers gegenüberliegende Rand des Mundloches.

Orgelflötenklänge mit Grundtönen oberhalb der Formantstrecke der Flöte (also oberhalb g_3) sind auf der Flöte mit Ausnahme des b_3 im p und mf nicht hervorzubringen.

Wesentliche Abweichungen ergibt der Vergleich der Klarinetten-Stimmen.

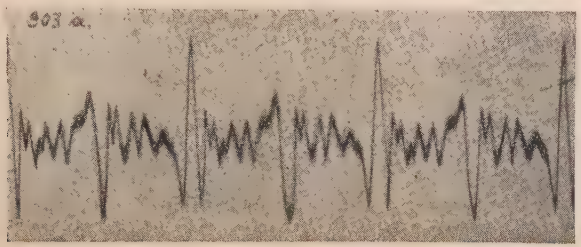
Während nach Schumann für die Klänge des Klarinetteninstrumentes neben der (besonders für das Schalmei- und Mittelregister typischen) hohlen Unterlage das Vorhandensein starker Partialtöne in den beiden Formantzonen h_2—g_3 und d_4—b_4 entscheidend ist, sind in den Orgel-Klarinettenstimmen die Partialtöne der angegebenen Formantzonen gegenüber den benachbarten Partialtönen nicht besonders stark ausgebildet. Lediglich die hohle Unterlage ist in allen Orgel-Klarinettenklängen betont. Vergl. z. B. die Analyse der einer Orgel-Klarinettenstimme auf f_0 entsprechenden Kurve 27.



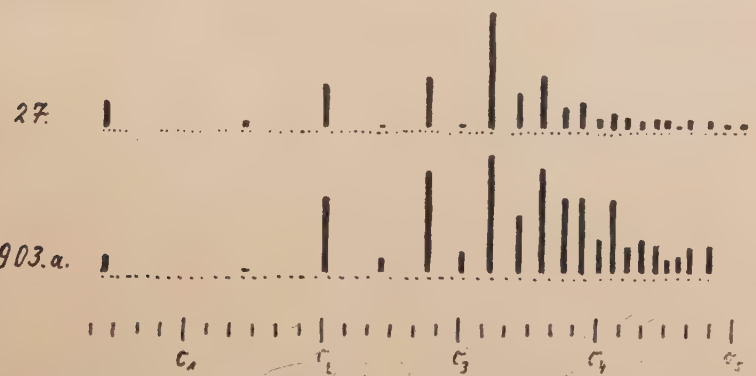
Fourieranalyse Kurve 27

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ampl.	0,22	0,04	0,36	0,01	0,42	0,02	1,00	0,30	0,45
P.T. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ampl.	0,17	0,22	0,07	0,12	0,09	0,05	0,07	0,07	0,01
P.T. Nr.	19	21	23	25					
Ampl.	0,07	0,06	0,02	0,03					

Die Partialtongruppe im Gebiet d_4—b_4 ist nur schwach ausgebildet. Dagegen zeigt ein gleich stark intonierter Klang des Klarinetteninstrumentes auf f_0 (Kurve 903a) die Klangteile in



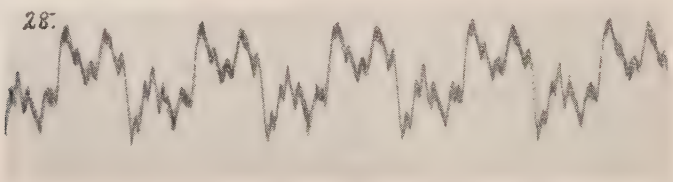
der Formantstrecke II mit relativ großen Amplituden. Vergl. dazu die unten zusammengestellten Amplitudenskalen der Kurven 27 und 903a:



Daß die ungeradzahligen Teiltöne als solche aber nicht an der dem Klarinettenklang eigenen Schärfe oder dem Näseln schuld sein können, hat bereits Stumpf[3] in seinen Versuchen über die Instrumentalklänge gefunden: „Läßt man mit einer

A-Klarinette ihren tiefsten Ton cis^0 blasen, stellt aber die Interferenz so ein, als gälte es, den gesamten Klang auf dem Grundton cis_1 (einschließlich dieses Tones selbst) auszulöschen, so kommen nur der Grundton cis und seine ungeradzahligen Teiltöne zum Vorschein. Man hat dann tatsächlich diejenige Klangstruktur, die theoretisch dem Klarinettenklang eigen sein soll. Ergebnis: der Klang hat noch unzweifelhaften Klarinettencharakter, aber er ist weicher und dunkler als vorher." Es fehlen eben Stärkemaxima in den von Schumann angegebenen Formantzonen b_2—g_3 und d_4—b_4. Als besonders geeignete Beispiele für diese Tatsache seien die Klangbilder von Orgelstimmen auf den Grundtönen a_0, es_1, f_1, g_1 und a_1 angeführt.

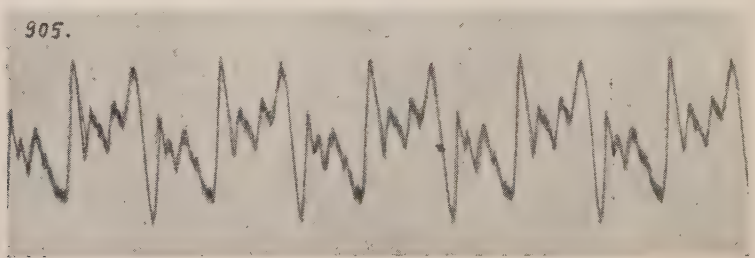
So fällt beim Vergleich der Analysen der a_0-Orgelstimme (Kurve 28)



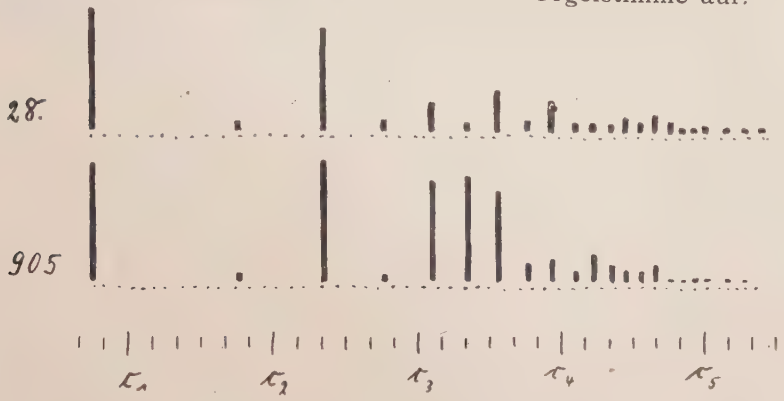
Fourieranalyse Kurve 28

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ampl.	1,00	0,07	0,85	0,09	0,24	0,07	0,34	0,09	0,25
P.T. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ampl.	0,07	0,07	0,06	0,12	0,07	0,14	0,08	0,03	0,03
P.T. Nr.	19	21	23	25					
Ampl.	0,05	0,03	0,02	0,03					

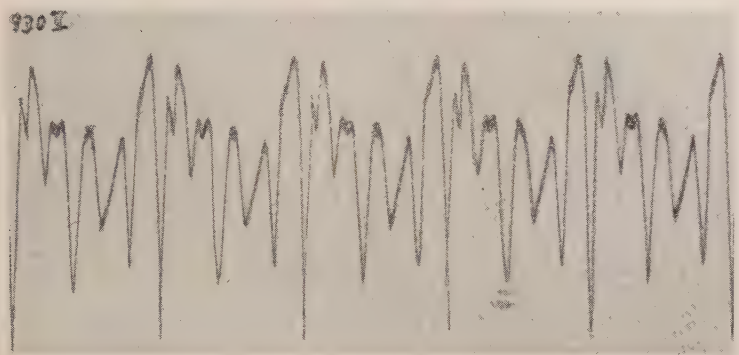
und des entsprechenden Klarinettenklanges (Kurve 905)



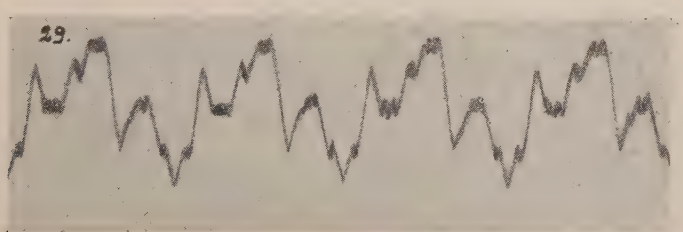
besonders der schwächere Formant I der Orgelstimme auf:



An Stelle der im es_1-Klarinettenklang (Kurve 930 II) be-



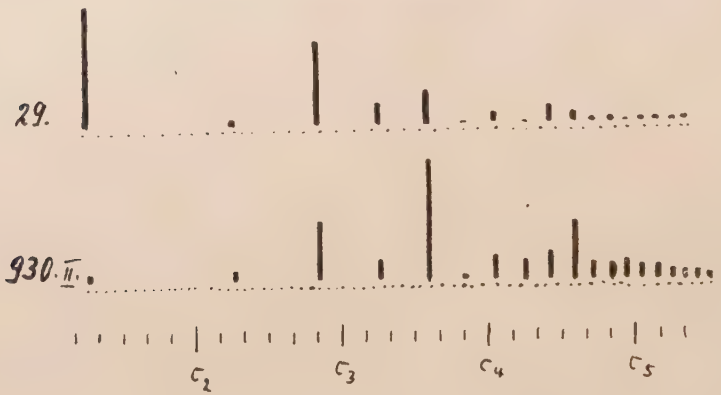
sonders gut ausgebildeten Klangteile in der Mitte der drei- und viergestrichenen Oktave läßt die Analyse der entsprechenden Orgelstimme (Kurve 29) nur schwache Erhebungen in den Formantzonen erkennen, betont aber die im Original-Klarinetten-



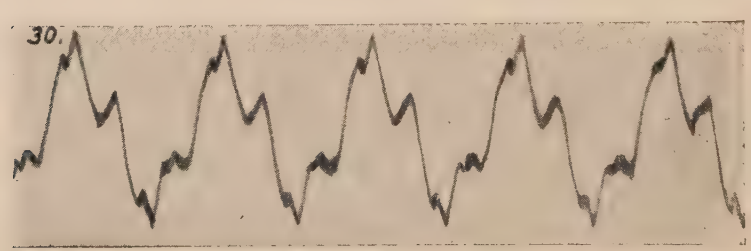
Fourieranalyse Kurve 29

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ampl.	1,00	0,05	0,69	0,16	0,27	0,01	0,09	0,01	0,14
P.T. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	
Ampl.	0,08	0,02	0,04	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	

klang nicht so ausgeprägte hohle Unterlage:

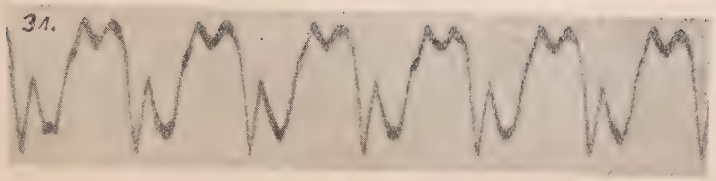


Auch die Analysen der Orgelstimmen auf f_1, g_1 und a_1 (Kurven 30, 31 und 32) lassen Mängel in der Ausbildung der



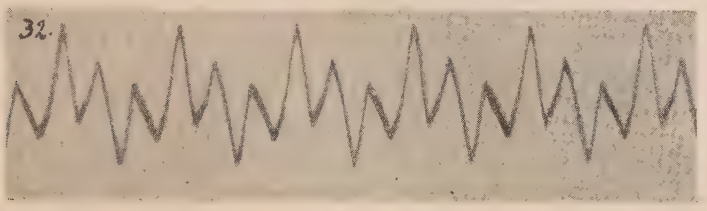
Fourieranalyse Kurve 30

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	1,00	0,08	0,34	0,02	0,14	0,02	0,05	0,03
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0	0,01



Fourieranalyse Kurve 31

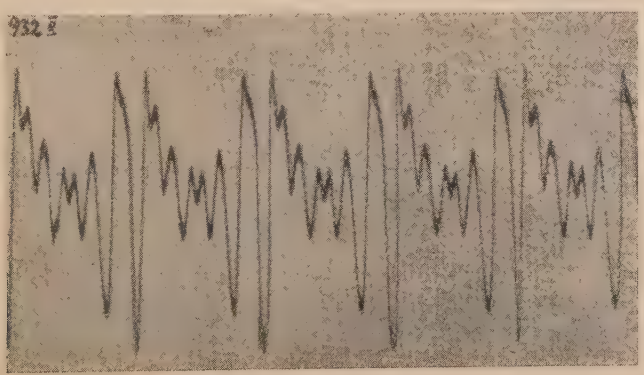
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	1,00	0,02	0,43	0,25	0,15	0,14
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,04	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01



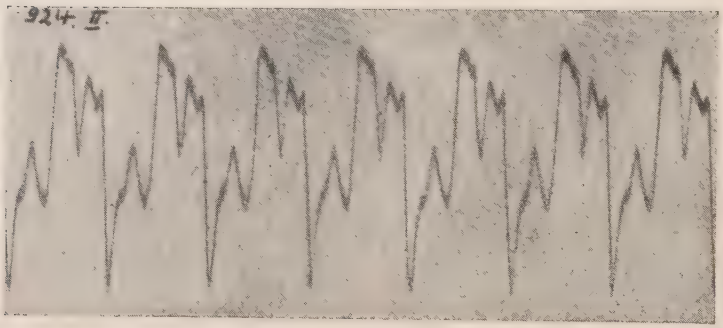
Fourieranalyse Kurve 32

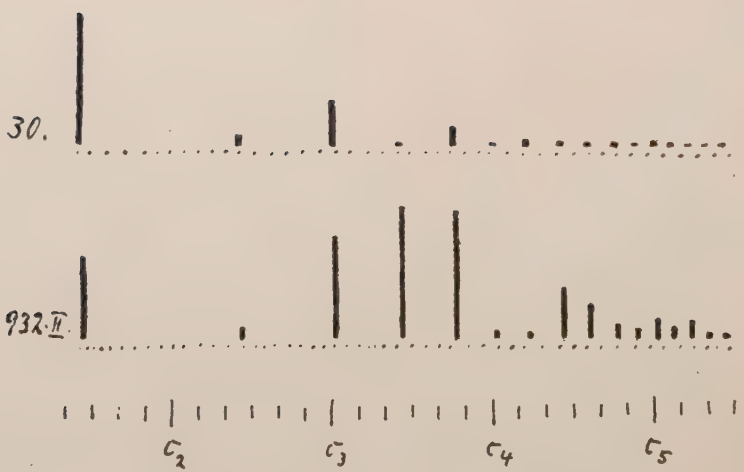
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,63	0,13	1,00	0,13	0,18	0,01	0,11	0,03
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,04	0,04	0,01	0,02	0,02	0,01	0	0,01

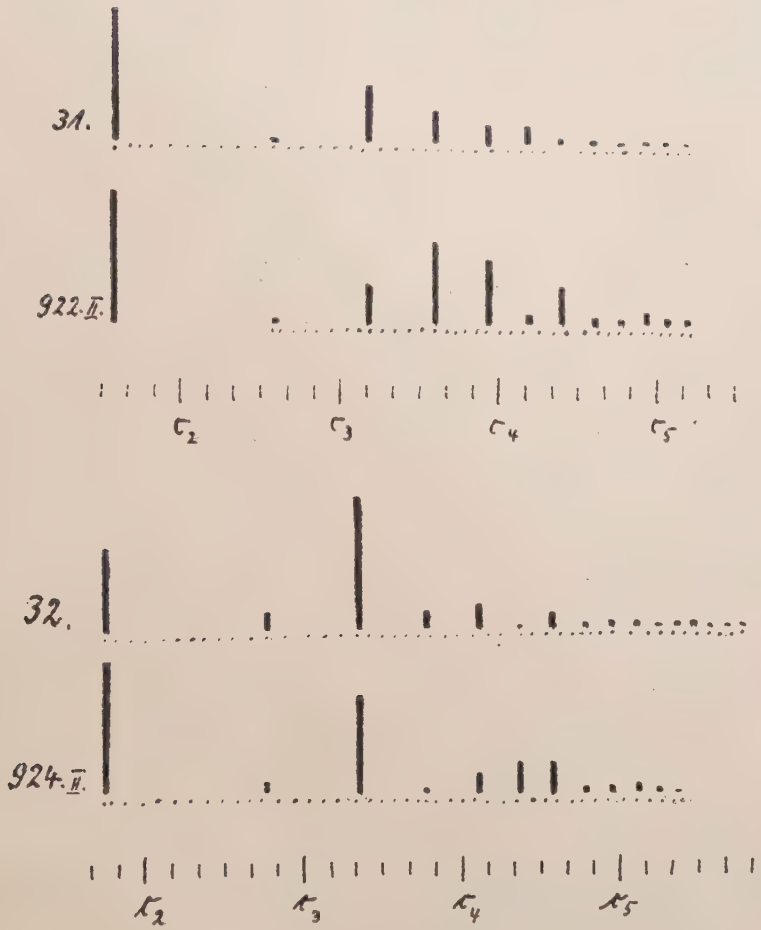
Partialtöne im Gebiet der Formanten erkennen. Zum Vergleich seien die Amplitudenskalen denen der entsprechenden Klarinettenklänge (Kurven 932 II, 922 II und 924 II) gegenübergestellt:



922 I


924 II


30.
932 II
C2
C3
C4
C5

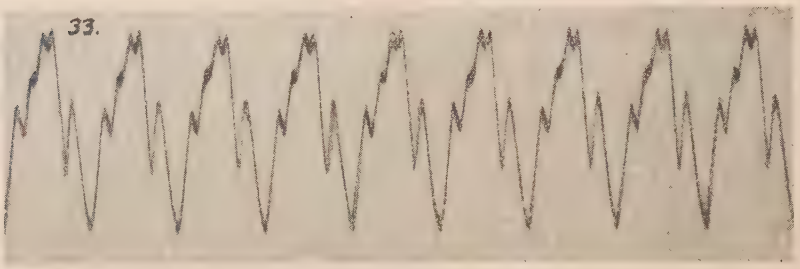


Auch die Analyse des Klangbildes der Orgelstimme h_1 ergab wie die Stimme auf a_1 (Kurve 32) keine nennenswerten Amplitudenwerte für die Klangelemente im Bereiche des Formanten II.

Beim Vergleich der Stimmen des Klarin- und höchsten Registers mit den entsprechenden Klängen der Klarinette zeigen sich noch größere Abweichungen. Entscheidend für die helle, glänzende Farbe der Töne des Klarinregisters ist nach den Untersuchungen von Stumpf und Schumann das Vorhandensein der geradzahligen Partialtöne. Die Analysen der Orgelklänge

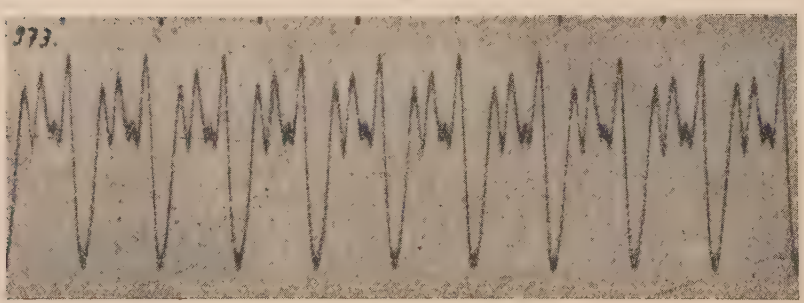
dieser Tonlagen zeigen aber — wie die Orgelklänge des Schalmei- und Mittelregisters — weiter den Ausfall geradzahliger Partialtöne.

Die Analyse des Oszillogramms einer e_2 - Orgelstimme (Kurve 33) liefert für den 2. Teilton nur 4% der größten Teil-

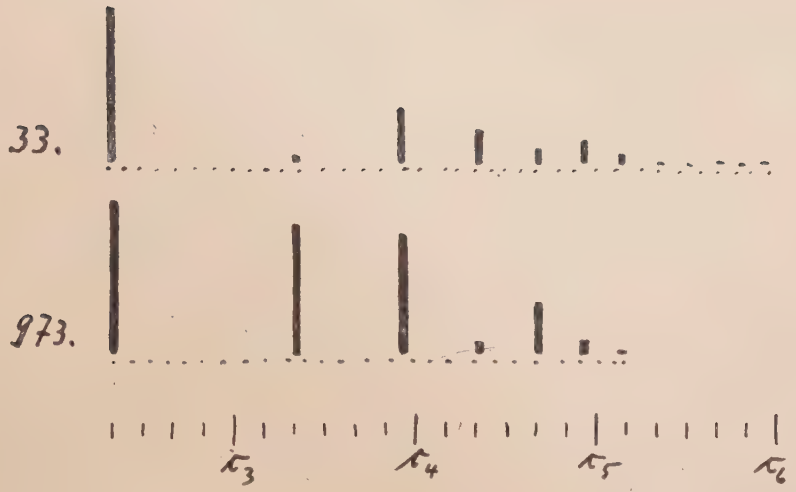


Fourieranalyse Kurve 33

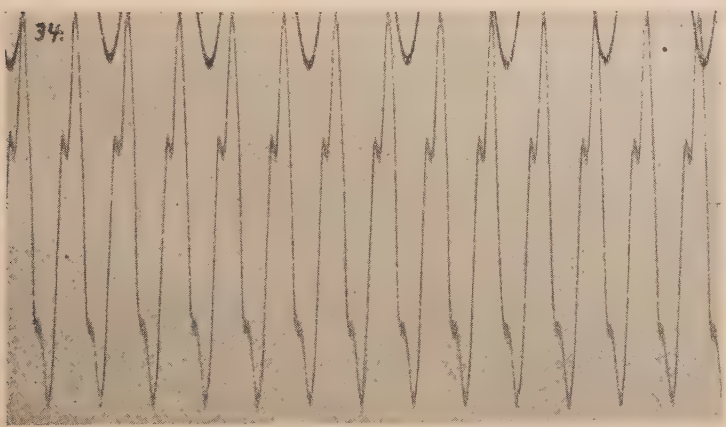
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6
Ampl.	1,00	0,04	0,35	0,21	0,10	0,15
P.T. Nr.	7	8	9	10	11	12
Ampl.	0,06	0,01	0	0,01	0	0,01



tonamplitude, während in einem der Kurve 973 entsprechenden e_2-Klarinettenklang auf die Oktave (etwa das Zentrum des Formanten I) noch 85 % des Maximums entfällt:



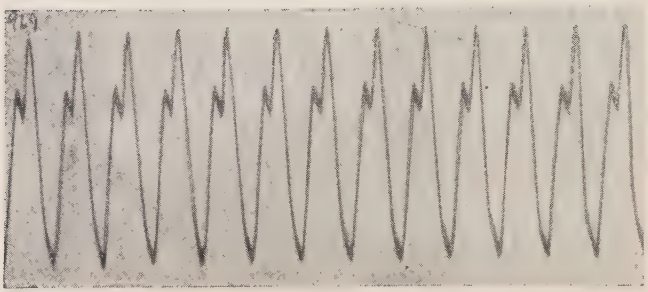
Auch die c_3-Orgelstimme (Kurve 34) enthält den 2. Partial-



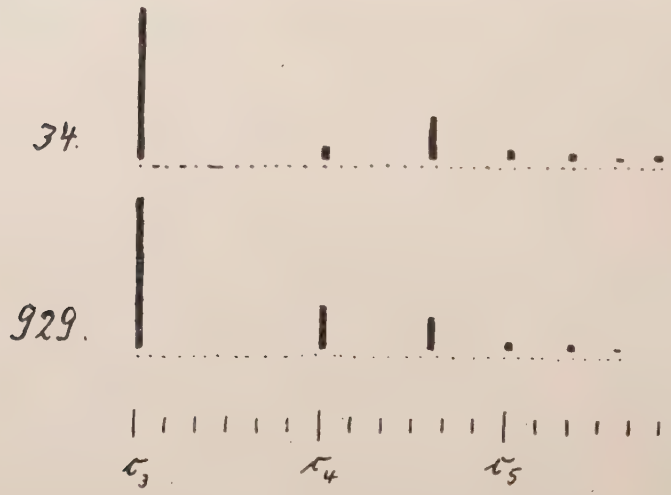
Fourieranalyse Kurve 34

Ampl.	1,00	0,08	0,27	0,06	0,05	0,01	0,02
P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7

ton nur mit 8 % des Maximums, während der 3. Partialton als zweitstärkstes Klangelement vertreten ist. Dagegen weist ein gleichstarker c_3-Klarinettenklang (Kurve 929) die Oktave des



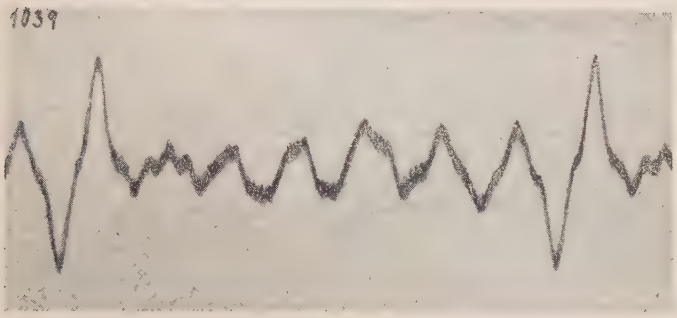
Grundtones mit 28 % bei schwächerer Duodezime auf:



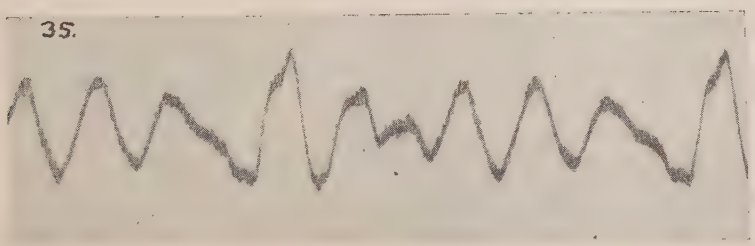
Der 3. Partialton kann zwar im ff-Klang des Klarinetteninstrumentes auch zweitstärkster Partialton werden, dann bleibt der 2. Partialton nur wenig hinter der Duodezime zurück.

Eines der den Klarinettenklang bestimmenden Merkmale, die hohle Unterlage, ist also bei den Orgelstimmen sowohl im Schalmei- und Mittel- als auch im Klarin- und höchsten Register zu ungunsten der beiden Formantregionen zu sehr betont. In der Regel fehlt das relative Stärkemaximum in der neben dem Formanten I entscheidenden Zone d_4 bis b_4.

Auch die Stimmen des Fagott-Registers zeigen erhebliche Verschiedenheiten gegenüber den entsprechenden Fagottklängen. Die im C-Klang des Fagotts (Kurve 1039) an sich schon



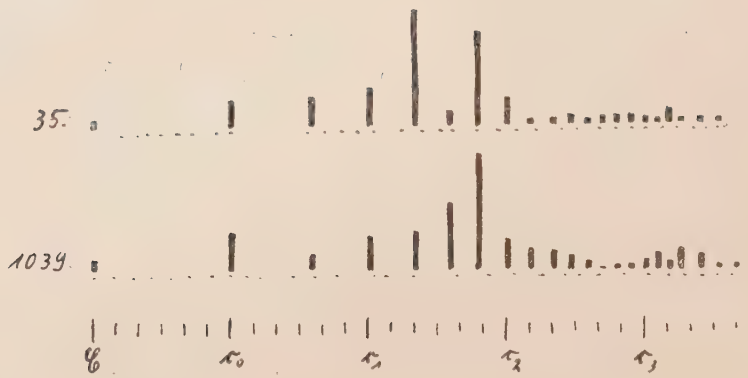
schwache Formantzone II ist in dem einer C-Fagottorgelstimme entsprechenden Klange (Kurve 35) nur durch den 18. Partial-



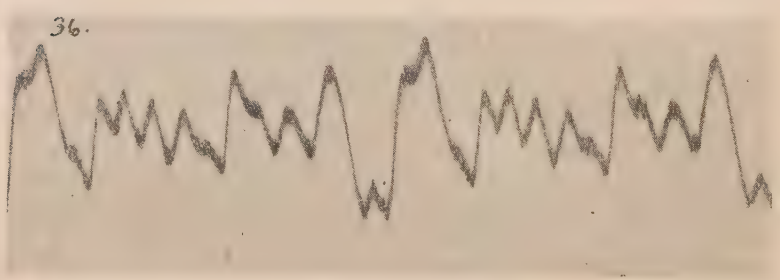
Fourieranalyse Kurve 35

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ampl.	0,07	0,23	0,25	0,31	1,00	0,11	0,80	0,23	0,04
P.T. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ampl.	0,05	0,07	0,04	0,06	0,06	0,06	0,05	0,03	0,11
P.T. Nr.	19	21	23						
Ampl.	0,03	0,04	0,03						

ton angedeutet. Außerdem liegt das absolute Maximum eine kleine Terz unter dem Formanten I:



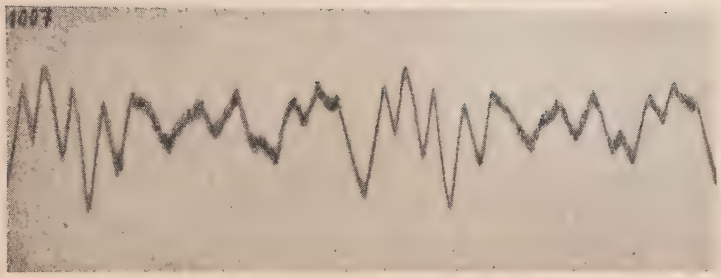
Die schon subjektiv beobachtete schwache Ähnlichkeit der Fis-Orgelstimme mit dem entsprechenden Fagottklang ist objektiv aus dem Vergleich der Fourieranalysen zu schließen. Kurve 36 entspricht der Orgelstimme,



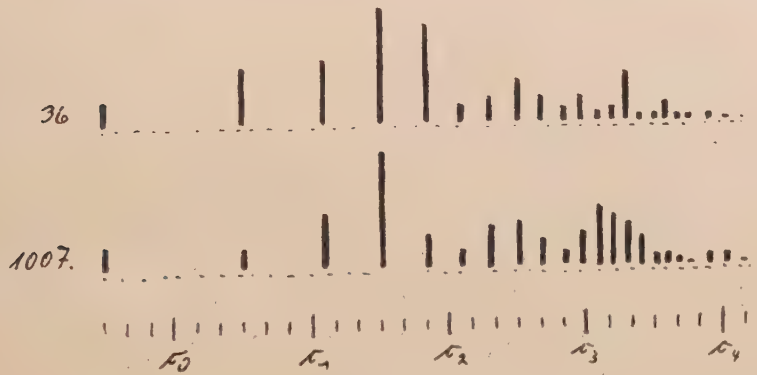
Fourieranalyse Kurve 36

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ampl.	0,19	0,48	0,55	1,00	0,85	0,15	0,22	0,37	0,21
P.T. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ampl.	0,12	0,21	0,08	0,12	0,41	0,05	0,05	0,15	0,05
P.T. Nr.	19	21	23	25					
Ampl.	0,04	0,05	0,01	0					

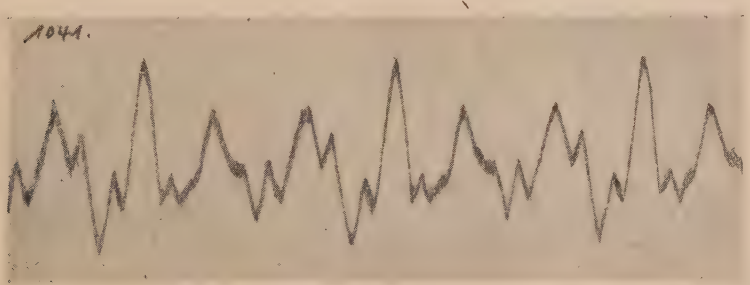
Kurve 1007 einem Fis-Fagottklang:



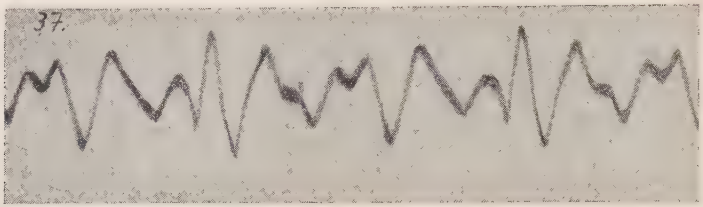
Beide Analysen zeigen das absolute Maximum an der unteren Grenze des Formanten I, ferner ein Stärkemaximum im Zentrum des Formanten II:



Erhebliche Abweichungen in der Stärkevertteilung von dem sehr charakteristischen c_0-Originalfagottklang (Kurve 1041)



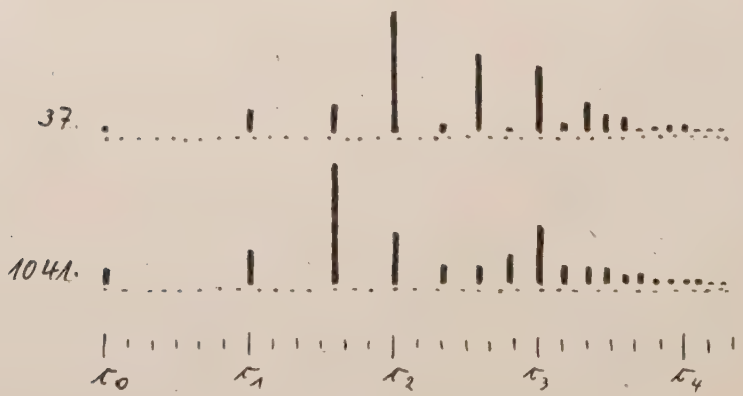
ergibt die Analyse einer c_0-Orgelfagottstimme (Kurve 37).



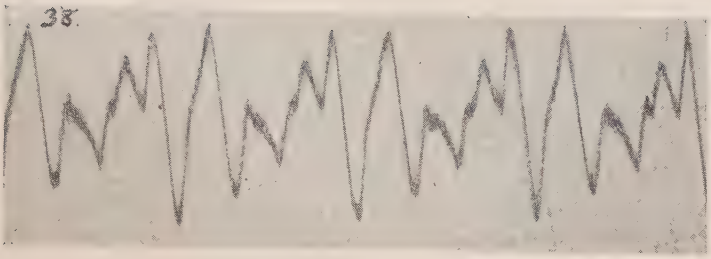
Fourieranalyse Kurve 37

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,05	0,19	0,22	1,00	0,06	0,64	0,03	0,53
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,06	0,24	0,14	0,11	0,01	0,02	0,05	0,05
P.T. Nr.	17	18	19					
Ampl.	0,01	0,01	0,01					

Während die Analyse 1041 für die Mitte zwischen den Formantgebieten (Gegend g_2) nur schwächere Amplituden ergibt, ist g_2 in Analyse 37 zweitstärkster Partialton:

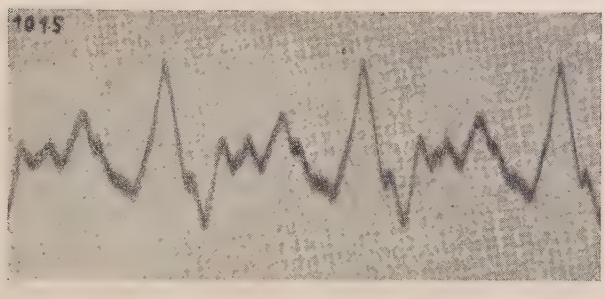


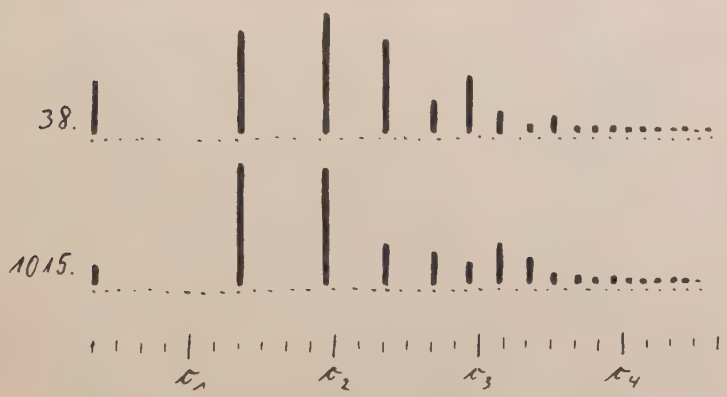
Eine größere Übereinstimmung zeigen die Klänge 38 (e_0-Orgelstimme) und 1015 (e_0-Fagottklang):



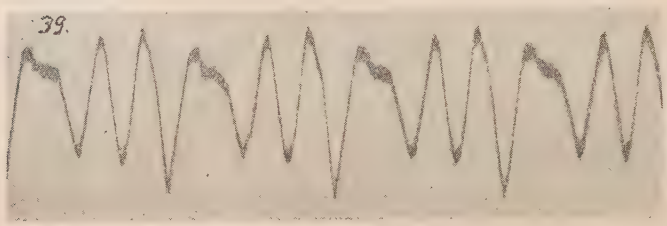
Fourieranalyse Kurve 38

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,44	0,85	1,00	0,77	0,26	0,46	0,18	0,07
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,13	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02
P.T. Nr.	17	18	19					
Ampl.	0,03	0	0,02					





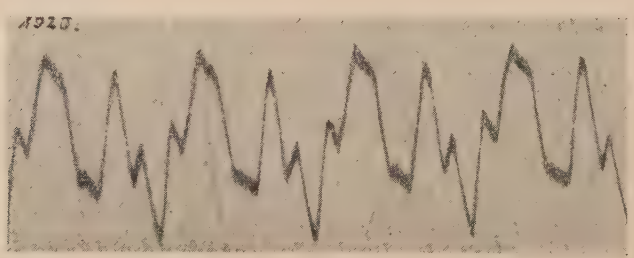
Dagegen erweisen sich die Orgelfagottstimmen auf Grundtönen fis_0—b_0 (h_0) als sehr verschieden von den entsprechendenden Fagottklängen; z. B. ist in Kurve 39 (as_0) wieder (wie in 37) die in den Fagottklängen schwache Mitte zwischen den

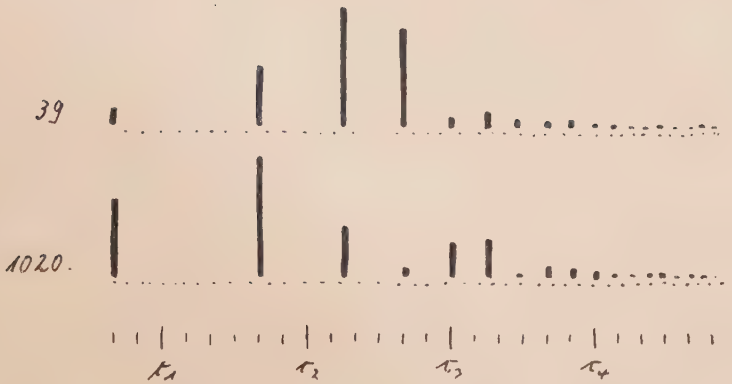


Fourieranalyse Kurve 39

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ampl.	0,14	0,50	1,00	0,82	0,08	0,13	0,06	0,05	0,06
P.T. Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ampl.	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0	0	0,02	0,01

Formantzonen I und II mit as_2 als zweitstärkstem Teilton stark vertreten. Als Vergleich sei der Fagottklang as_0 (Kurve 1020) angeführt:

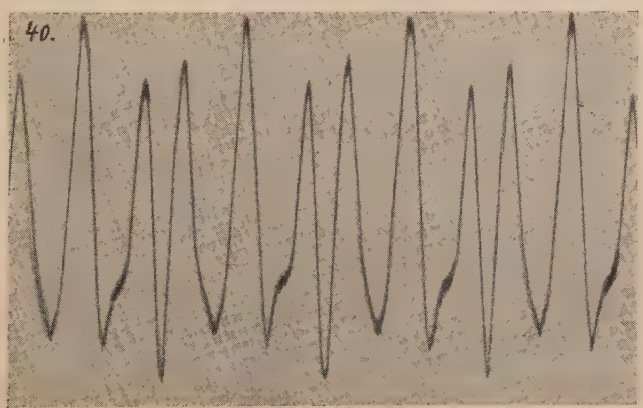




Die dünne Farbe der Fagottklänge mit Grundtönen oberhalb c_1 weicht von den tiefen (rauhen) und den mittleren (etwas matteren) Klängen erheblich ab. Schumann bemerkt:

„Der Grundton ist in der Regel stärkster Teil. Neben der starken Oktave ist im c_1-Klang c_3 ausschlaggebend; da g_2 auch kräftig, sind die Formantgebiete I und II nicht, wie in tieferen Klängen, durch eine Gruppe von schwachen Partialtönen voneinander geschieden. Infolgedessen ist oberhalb c_1 das Erkennen des Fagottklanges als solchen bei Abschneidung des Einsatzes nur schwer möglich. Diese Schwierigkeit wächst mit weiter steigendem Grundton."

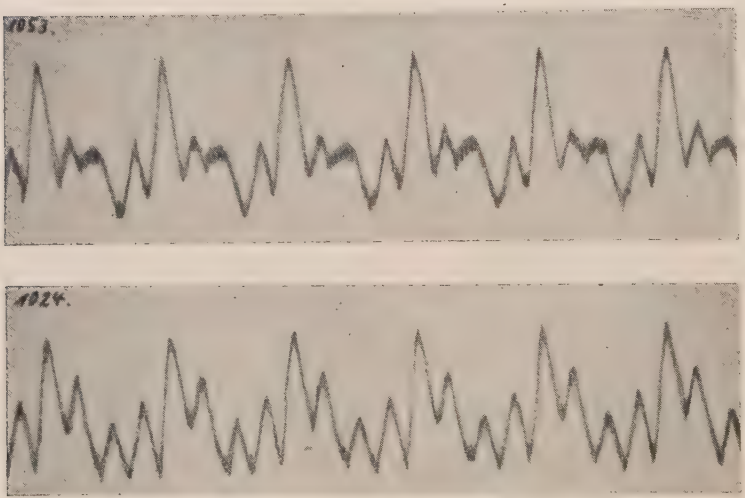
Da somit in dieser Region das Typische des Fagottklanges verloren geht, wird in der Regel bei der Orgel das Fagottregister beim Tone cis_1 in das Oboeregister übergeführt. Die höchste Fagott-Orgelstimme c_1 (Kurve 40) lieferte das absolute Maxi-



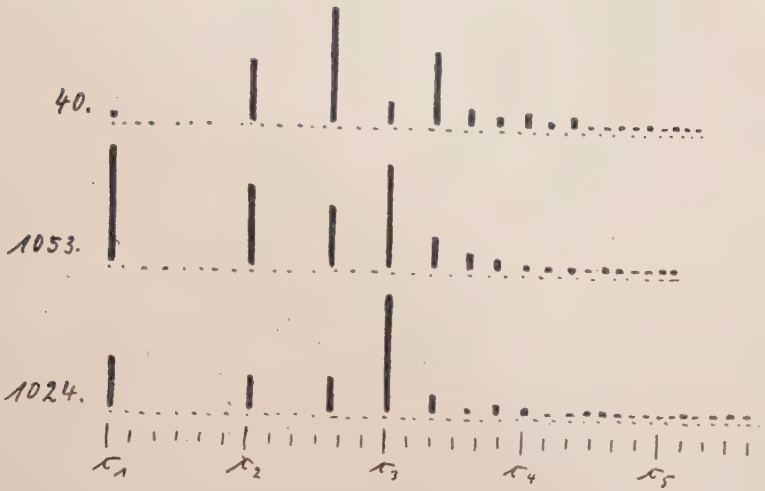
Fourieranalyse Kurve 40

P.T. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Ampl.	0,04	0,52	1,00	0,19	0,63	0,14	0,07	0,11
P.T. Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16
Ampl.	0,04	0,08	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01
P.T. Nr.	17	18	19					
Ampl.	0,03	0,02	0,02					

mum auf dem 3. Partialton, während dieses in den c_1-Klängen des Fagotts (Kurven 1053 und 1024) entweder auf dem Grund-



ton oder (im ff) im Formant II, nicht aber in der bei tieferen



Fagottklängen stets schwächer ausgebildeten Region zwischen den beiden Formantstrecken g_1—e_2 und b_2—fis_3 zu finden ist.

Eine Untersuchung der vorliegenden Art, die sich auf alle anderen Register der Orgel erstreckt, soweit deren Klänge denen bestimmter Orchesterinstrumente gleich oder möglichst nahe kommen sollen, ist notwendig. Erst wenn feststeht, in welcher Weise die akustischen Strukturen der Orgelregisterklänge Mängel gegenüber denen der Orchesterklangfarben aufweisen, kann der Orgelbauer — wie dies die Firmen Joh. Klais (Bonn) und Dr. Walcker — Sauer (Frankfurt a. d. Oder) stets betont haben — Abhilfe schaffen. Zum Beispiel wären in den gedackten Orgelstimmen, bei denen die Partialtöne im unteren Formanten (des betreffenden Instruments, dessen Klang nachgeahmt werden soll) gut ausgebildet sind,

lediglich in dem Deckel etwa 2 offene, sehr schwach anzublasende[4] Pfeifenröhrchen einzusetzen, deren Frequenz mit der im Gebiete des Formanten II am meisten hervortretenden Teiltöne übereinstimmt. Jedoch werden diese rein praktischen Aufgaben durch die Vertreter der Orgelbauindustrie dann eine schnelle und wohl auch noch einfachere Lösung erfahren, wenn der Akustiker genau angibt, in welcher Richtung die Verbesserung vorzunehmen ist, das heißt, welche Teiltongruppen herausgehoben, welche unterdrückt werden sollen. Diese Fragen konnten aber bisher von den Laboratorien der Orgelbauindustrie — soweit diese überhaupt wissenschaftliche Verfahren in Anwendung bringen — noch nicht beantwortet werden.

Kurve 1 (e_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,012	— 0,012	0,017	0,04
2	+ 0,023	— 0,005	0,023	0,05
3	— 0,091	+ 0,012	0,092	0,20
4	— 0,020	— 0,463	0,464	1,00
5	— 0,111	— 0,021	0,113	0,24
6	— 0,017	+ 0,002	0,017	0,04
7	+ 0,050	+ 0,012	0,051	0,11
8	— 0,030	+ 0,004	0,030	0,06
9	+ 0,037	+ 0,007	0,037	0,08
10	— 0,003	+ 0,013	0,013	0,03
11	+ 0,003	+ 0,008	0,09	0,02
12	+ 0,028	— 0,007	0,028	0,06
13	+ 0,014	+ 0,018	0,023	0,05
14	+ 0,006	+ 0,006	0,008	0,02
15	+ 0,007	+ 0,004	0,008	0,02
16	+ 0,011	+ 0,002	0,011	0,02
17	0	+ 0,010	0,010	0,02
18	+ 0,010	+ 0,003	0,010	0,02
19	+ 0,001	— 0,003	0,003	0,01

Kurve 2 (f_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,035	+ 0,004	0,035	0,14
2	+ 0,018	+ 0,019	0,026	0,10
3	+ 0,065	— 0,080	0,103	0,40
4	— 0,065	— 0,250	0,258	1,00
5	+ 0,020	— 0,030	0,036	0,14
6	— 0,020	— 0,005	0,020	0,08
7	0	— 0,016	0,016	0,06
8	+ 0,016	— 0,015	0,022	0,09
9	+ 0,004	— 0,008	0,008	0,03
10	— 0,003	+ 0,001	0,003	0,01
11	+ 0,001	— 0,004	0,004	0,02
12	— 0,007	+ 0,003	0,008	0,03
13	+ 0,001	+ 0,005	0,005	0,02
14	+ 0,001	— 0,002	0,002	0,01

Kurve 3 (fis_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,038	— 0,026	0,046	0,21
2	+ 0,083	+ 0,008	0,084	0,38
3	+ 0,059	— 0,079	0,099	0,44
4	— 0,168	— 0,147	0,223	1,00
5	+ 0,058	— 0,048	0,076	0,34
6	— 0,016	+ 0,014	0,021	0,09
7	+ 0,010	— 0,021	0,023	0,10
8	+ 0,012	+ 0,016	0,020	0,09
9	— 0,007	— 0,005	0,008	0,04
10	— 0,008	+ 0,005	0,009	0,04
11	— 0,008	— 0,002	0,008	0,04
12	+ 0,003	— 0,003	0,003	0,01
13	+ 0,001	— 0,002	0,002	0,01
14	+ 0,002	— 0,001	0,002	0,01
15	— 0,002	0	0,002	0,01
16	+ 0,006	0	0,006	0,03

Kurve 4 (fis_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,010	0	0,010	0,03
2	+ 0,011	— 0,008	0,014	0,04
3	— 0,040	+ 0,028	0,049	0,14
4	+ 0,075	— 0,348	0,356	1,00
5	+ 0,006	— 0112	0,112	0,31
6	— 0,015	— 0,018	0,023	0,06
7	— 0,003	+ 0,014	0,014	0,04
8	+ 0,003	— 0,054	0,054	0,15
9	+ 0,025	— 0,061	0,066	0,19
10	+ 0,037	+ 0,007	0,037	0,10
11	— 0,002	+ 0,007	0,007	0,02
12	— 0,018	+ 0,010	0,021	0,05
13	— 0,012	— 0,005	0,013	0,04
14	— 0,009	— 0,005	0,010	0,03

Kurve 5 (g_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,010	+ 0,018	0,020	0,16
2	— 0,043	— 0,022	0,048	0,38
3	+ 0,009	— 0,125	0,126	1,00
4	— 0,013	— 0,069	0,072	0,57
5	+ 0,028	+ 0,002	0,028	0,22
6	— 0,010	+ 0,002	0,010	0,08
7	— 0,005	— 0,000	0,005	0,04
8	+ 0,004	+ 0,010	0,011	0,09
9	+ 0,007	— 0,003	0,008	0,06
10	+ 0,002	— 0,003	0,003	0,02
11	— 0,006	0	0,006	0,04
12	— 0,002	— 0,001	0,002	0,02
13	+ 0,002	+ 0,001	0,002	0,02
14	+ 0,001	+ 0,004	0,004	0,03
15	+ 0,004	+ 0,003	0,005	0,04
16	+ 0,001	— 0,000	0,001	0,01

Kurve 6 (g_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,005	+ 0,008	0,009	0,02
2	— 0,026	— 0,071	0,076	0,19
3	+ 0,109	— 0,088	0,140	0,36
4	— 0,124	— 0,365	0,386	1,00
5	+ 0,094	— 0,018	0,096	0,25
6	— 0,025	+ 0,056	0,061	0,16
7	— 0,003	+ 0,033	0,033	0,09
8	— 0,012	+ 0,039	0,040	0,10
9	+ 0,028	+ 0,032	0,043	0,11
10	+ 0,038	+ 0,007	0,039	0,10
11	+ 0,015	— 0,005	0,016	0,04
12	+ 0,011	+ 0,004	0,012	0,03
13	+ 0,014	+ 0,007	0,016	0,04
14	+ 0,011	+ 0,007	0,013	0,03
15	+ 0,008	+ 0,011	0,014	0,04
16	+ 0,013	0,000	0,013	0,03

Kurve 7 (a_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,014	— 0,016	0,021	0,07
2	+ 0,051	— 0,073	0,089	0,28
3	— 0,040	— 0,311	0,314	1,00
4	— 0,045	— 0,019	0,049	0,16
5	— 0,008	+ 0,024	0,025	0,08
6	+ 0,014	+ 0,031	0,034	0,11
7	+ 0,017	— 0,006	0,018	0,06
8	+ 0,001	— 0,010	0,010	0,03
9	— 0,004	— 0,003	0,005	0,02
10	— 0,003	— 0,005	0,006	0,02
11	— 0,003	0	0,003	0,01
12	— 0,004	+ 0,001	0,004	0,01

Kurve 8 (a_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	— 0,013	+ 0,009	0,016	0,07
2	— 0,093	— 0,071	0,117	0,52
3	+ 0,147	— 0,170	0,225	1,00
4	+ 0,055	— 0,095	0,110	0,49
5	+ 0,007	— 0,020	0,021	0,09
6	+ 0,012	+ 0,001	0,012	0,05
7	— 0,003	+ 0,009	0,009	0,04
8	— 0,018	+ 0,003	0,018	0,08
9	— 0,014	— 0,002	0,014	0,06
10	— 0,007	0	0,007	0,03
11	— 0,004	+ 0,003	0,005	0,02
12	— 0,002	— 0,001	0,002	0,01

Kurve 9 (a_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	— 0,007	— 0,022	0,023	0,06
2	— 0,105	+ 0,013	0,106	0,30
3	— 0,116	— 0,320	0,355	1,00
4	+ 0,060	— 0,043	0,074	0,21
5	+ 0,042	— 0,006	0,042	0,12
6	+ 0,007	+ 0,023	0,024	0,07
7	— 0,037	+ 0,002	0,037	0,10
8	+ 0,011	+ 0,019	0,022	0,06
9	+ 0,035	+ 0,029	0,045	0,13
10	+ 0,007	— 0,010	0,012	0,03
11	— 0,001	— 0,013	0,013	0,04
12	+ 0,001	— 0,006	0,006	0,02

Kurve 10 (h_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,004	— 0,040	0,040	0,14
2	+ 0,060	+ 0,003	0,060	0,21
3	— 0,023	— 0,286	0,287	1,00
4	+ 0,016	+ 0,009	0,018	0,06
5	— 0,020	+ 0,010	0,023	0,08
6	+ 0,001	+ 0,024	0,024	0,08
7	— 0,010	— 0,001	0,010	0,03
8	— 0,005	— 0,002	0,005	0,02
9	— 0,002	0	0,002	0,01

Kurve 11 (h_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	— 0,031	0	0,031	0,10
2	+ 0,010	— 0,080	0,081	0,25
3	— 0,180	— 0,270	0,325	1,00
4	0	0	0	0
5	+ 0,036	+ 0,026	0,045	0,14
6	+ 0,028	— 0,035	0,045	0,14
7	— 0,004	+ 0,002	0,004	0,01
8	+ 0,009	— 0,012	0,015	0,05
9	+ 0,006	+ 0,005	0,008	0,02
10	— 0,002	+ 0,003	0,003	0,01

Kurve 12 (h_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,009	+ 0,026	0,027	0,07
2	— 0,047	+ 0,014	0,049	0,13
3	— 0,040	— 0,388	0,390	1,00
4	— 0,006	— 0,043	0,043	0,11
1	+ 0,012	— 0,012	0,017	0,04
5	+ 0,009	— 0,009	0,013	0,15
6	+ 0,048	— 0,032	0,058	0,15
7	+ 0,009	+ 0,020	0,022	0,06
8	+ 0,006	— 0,003	0,007	0,02
9	+ 0,013	— 0,007	0,015	0,04
10	+ 0,010	— 0,002	0,010	0,03
11	— 0,005	+ 0,002	0,005	0,01
12	— 0,001	0	0,001	0,00

Kurve 13 (c_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,014	0	0,014	0,15
2	— 0,025	— 0,050	0,056	0,59
3	+ 0,025	— 0,091	0,095	1,00
4	0	+ 0,006	0,006	0,06
5	+ 0,005	— 0,003	0,006	0,06
6	+ 0,009	— 0,003	0,009	0,09
7	+ 0,002	— 0,003	0,003	0,03
8	— 0,002	+ 0,003	0,003	0,03
9	+ 0,001	+ 0,008	0,008	0,08
10	+ 0,003	+ 0,005	0,006	0,06
11	+ 0,003	+ 0,003	0,004	0,04
12	+ 0,003	+ 0,002	0,003	0,03

Kurve 14 (c_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,028	+ 0,005	0,028	0,04
2	+ 0,024	— 0,033	0,041	0,06
3	+ 0,066	— 0,653	0,656	1,00
4	— 0,018	— 0,045	0,048	0,07
5	— 0,010	— 0,037	0,038	0,06
6	+ 0,006	— 0,043	0,043	0,07
7	— 0,005	+ 0,028	0,028	0,04
8	+ 0,017	— 0,001	0,017	0,03
9	+ 0,035	— 0,006	0,035	0,05
10	+ 0,011	+ 0,012	0,016	0,02
11	+ 0,009	0,000	0,009	0,01
12	+ 0,011	+ 0,013	0,017	0,03

Kurve 15 (c_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,027	— 0,044	0,051	0,18
2	— 0,052	— 0,027	0,058	0,21
3	+ 0,055	— 0,270	0,277	1,00
4	— 0,025	— 0,006	0,027	0,09
5	— 0,006	— 0,009	0,011	0,04
6	+ 0,017	+ 0,016	0,023	0,08
7	— 0,001	+ 0,041	0,041	0,15
8	+ 0,008	+ 0,009	0,012	0,04
9	— 0,016	— 0,016	0,023	0,08
10	+ 0,001	— 0,004	0,004	0,01
10	+ 0,001	— 0,004	0,004	0,01
11	— 0,002	+ 0,001	0,002	0,01
12	+ 0,003	+ 0,001	0,003	0,01

Kurve 16 (d_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,026	+ 0,042	0,050	0,21
2	— 0,070	— 0,222	0,233	1,00
3	— 0,001	— 0,112	0,112	0,48
4	+ 0,005	+ 0,015	0,015	0,06
5	+ 0,011	0	0,011	0,05
6	0	+ 0,002	0,002	0,01
7	— 0,011	— 0,004	0,011	0,05
8	— 0,002	0	0,002	0,01
9	+ 0,002	+ 0,004	0,004	0,02
10	+ 0,005	+ 0,004	0,006	0,03

Kurve 17 (e_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	— 0,020	— 0,015	0,025	0,03
2	— 0,054	— 0,970	0,972	1,00
3	+ 0,079	— 0,050	0,094	0,10
4	— 0,015	— 0,056	0,058	0,06
5	+ 0,070	— 0,048	0,084	0,09
6	— 0,013	+ 0,021	0,025	0,03
7	— 0,011	+ 0,009	0,014	0,01
8	— 0,005	+ 0,002	0,005	0,01

Kurve 18 (e_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,007	+ 0,004	0,008	0,02
2	— 0,166	— 0,377	0,412	1,00
3	— 0,012	— 0,027	0,030	0,07
4	+ 0,067	— 0,005	0,067	0,16
5	+ 0,015	— 0,021	0,026	0,06
6	+ 0,033	— 0,015	0,036	0,09
7	+ 0,019	— 0,007	0,020	0,05
8	+ 0,010	— 0,006	0,012	0,03
9	— 0,000	— 0,010	0,010	0,02
10	— 0,000	— 0,005	0,005	0,01

Kurve 19 (e_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,015	— 0,073	0,074	0,11
2	— 0,538	— 0,390	0,665	1,00
3	+ 0,038	+ 0,028	0,047	0,07
4	+ 0,080	— 0,153	0,173	0,26
5	— 0,107	— 0,080	0,134	0,20
6	+ 0,036	+ 0,005	0,036	0,05
7	+ 0,025	+ 0,110	0,113	0,17
8	+ 0,012	+ 0,021	0,024	0,04
9	+ 0,035	+ 0,032	0,047	0,07
10	+ 0,020	+ 0,021	0,029	0,04
11	+ 0,031	+ 0,016	0,035	0,05
12	+ 0,030	+ 0,007	0,031	0,05
13	+ 0,004	+ 0,003	0,005	0,01

Kurve 20 (f_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,103	— 0,002	0,103	0,22
2	+ 0,006	— 0,475	0,475	1,00
3	+ 0,025	+ 0,010	0,027	0,06
4	+ 0,023	+ 0,035	0,041	0,09
5	— 0,003	— 0,002	0,003	0,01
6	— 0,011	— 0,001	0,011	0,02
7	— 0,005	0	0,005	0,01
8	— 0,005	+ 0,001	0,005	0,01

Kurve 21 (f_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,030	+ 0,020	0,036	0,03
2	— 0,340	— 1,090	1,142	1,00
3	+ 0,030	— 0,020	0,036	0,03
4	+ 0,125	+ 0,145	0,191	0,17
5	+ 0,002	+ 0,030	0,030	0,03
6	+ 0,035	0	0,035	0,03
7	+ 0,002	+ 0,023	0,023	0,02
8	+ 0,032	+ 0,040	0,051	0,04

Kurve 22 (g_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,102	— 0,085	0,133	0,74
2	+ 0,150	— 0,098	0,179	1,00
3	— 0,047	— 0,014	0,049	0,27
4	— 0,010	— 0,013	0,016	0,09
5	— 0,010	+ 0,001	0,010	0,06
6	+ 0,005	+ 0,001	0,005	0,03
7	+ 0,001	+ 0,005	0,005	0,03
8	+ 0,002	+ 0,008	0,008	0,04

Kurve 23 (g_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,186	+ 0,044	0,191	0,38
2	— 0,086	— 0,500	0,507	1,00
3	+ 0,050	— 0,128	0,138	0,27
4	+ 0,082	+ 0,036	0,090	0,18
5	+ 0,027	— 0,041	0,049	0,10
6	+ 0,007	+ 0,025	0,026	0,05
7	+ 0,013	— 0,026	0,029	0,06
8	— 0,007	+ 0,003	0,008	0,01

Kurve 24 (g_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,140	— 0,052	0,149	0,70
2	— 0,036	— 0,210	0,213	1,00
3	+ 0,045	— 0,058	0,074	0,35
4	— 0,011	+ 0,018	0,021	0,10
5	—,0,006	0,018	0,019	0,09
6	— 0,028	— 0,016	0,033	0,15
7	— 0,003	— 0,005	0,006	0,03
8	+ 0,003	— 0,002	0,003	0,01

Kurve 25 (a_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,258	— 0,129	0,289	0,95
2	+ 0,090	— 0,290	0,304	1,00
3	+ 0,024	— 0,015	0,029	0,10
4	+ 0,010	+ 0,032	0,033	0,11
5	+ 0,015	— 0,015	0,021	0,07
6	+ 0,005	0	0,005	0,02

Kurve 26 (a_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,309	— 0,062	0,315	0,94
2	+ 0,093	— 0,322	0,335	1,00
3	+ 0,030	— 0,085	0,090	0,27
4	— 0,050	+ 0,031	0,058	0,17
5	+ 0,011	— 0,018	0,021	0,06
6	+ 0,008	— 0,012	0,014	0,04

Kurve 27 (f_0)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,104	— 0,040	0,111	0,22
2	— 0,020	+ 0,005	0,021	0,04
3	— 0,168	+ 0,077	0,185	0,36
4	+ 0,005	— 0,003	0,006	0,01
5	— 0,110	— 0,180	0,211	0,42
7	— 0,110	+ 0,495	0,507	1,00
8	— 0,085	— 0,125	0,151	0,30
9	+ 0,124	+ 0,190	0,227	0,45
10	— 0,078	+ 0,037	0,086	0,17
11	+ 0,105	— 0,029	0,109	0,22
12	— 0,020	+ 0,028	0,034	0,07
13	+ 0,058	— 0,010	0,059	0,12
14	+ 0,038	+ 0,030	0,048	0,09
15	+ 0,026	— 0,004	0,026	0,05
16	+ 0,033	— 0,002	0,033	0,07
17	+ 0,009	+ 0,035	0,036	0,07
18	+ 0,002	— 0,004	0,005	0,01
19	+ 0,024	+ 0,022	0,033	0,07
21	+ 0,027	— 0,011	0,029	0,06
23	— 0,007	— 0,003	0,008	0,03
25	+ 0,001	— 0,017	0,017	0,03

Kurve 28 (a_0)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,136	— 0,065	0,151	1,00
2	0	+ 0,010	0,010	0,07
3	— 0,028	— 0,126	0,129	0,85
4	+ 0,011	— 0,008	0,014	0,09
5	— 0,030	— 0,020	0,036	0,24
6	— 0,010	+ 0,005	0,011	0,07
7	— 0,028	— 0,044	0,052	0,34
8	— 0,012	+ 0,007	0,014	0,09
9	+ 0,029	— 0,024	0,038	0,25
10	+ 0,010	— 0,004	0,011	0,07
11	— 0,008	— 0,006	0,010	0,07
12	+ 0,006	— 0,007	0,009	0,06
13	+ 0,009	+ 0,016	0,018	0,12
14	+ 0,007	+ 0,008	0,011	0,07
15	+ 0,020	+ 0,007	0,021	0,14
16	+ 0,004	— 0,011	0,012	0,08
17	— 0,005	— 0,002	0,005	0,03
18	— 0,002	— 0,003	0,004	0,03

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
19	— 0,004	— 0,006	0,007	0,05
21	— 0,002	— 0,003	0,004	0,03
23	+ 0,003	— 0,001	0,003	0,02
25	+ 0,004	— 0,001	0,004	0,03

Kurve 29 (es_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,042	— 0,238	0,242	1,00
2	— 0,010	+ 0,005	0,011	0,05
3	+ 0,003	— 0,167	0,167	0,69
4	+ 0,028	— 0,026	0,038	0,16
5	— 0,061	+ 0,025	0,066	0,27
6	— 0,001	— 0,002	0,002	0,01
7	+ 0,005	— 0,021	0,021	0,09
8	0	— 0,003	0,003	0,01
9	+ 0,014	+ 0,030	0,033	0,14
10	— 0,010	+ 0,016	0,019	0,08
11	+ 0,003	+ 0,003	0,004	0,02
12	— 0,001	+ 0,010	0,010	0,04
13	— 0,001	— 0,003	0,003	0,01
14	+ 0,004	+ 0,002	0,005	0,02
15	— 0,002	+ 0,004	0,005	0,02
16	— 0,003	+ 0,001	0,003	0,01
17	— 0,004	— 0,003	0,005	0,02

Kurve 30 (f_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,002	— 0,371	0,371	1,00
2	— 0,031	— 0,005	0,031	0,08
3	+ 0,119	— 0,040	0,126	0,34
4	+ 0,003	+ 0,009	0,009	0,02
5	— 0,044	— 0,027	0,052	0,14
6	— 0,007	— 0,001	0,007	0,02
7	+ 0,008	+ 0,018	0,020	0,05
8	— 0,010	+ 0,007	0,012	0,03
9	— 0,002	+ 0,010	0,010	0,03
10	— 0,010	+ 0,003	0,010	0,03
11	— 0,001	+ 0,009	0,009	0,02
12	— 0,010	— 0,001	0,010	0,03
13	0	— 0,006	0,006	0,02
14	+ 0,003	+ 0,003	0,004	0,01
15	0	0	0	0
16	+ 0,002	— 0,003	0,003	0,01

Kurve 31 (g_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,245	— 0,138	0,281	1,00
2	+ 0,004	+ 0,004	0,006	0,02
3	— 0,0,37	— 0,116	0,122	0,43
4	+ 0,022	— 0,067	0,071	0,25
5	+ 0,002	— 0,042	0,042	0,15
6	+ 0,002	— 0,040	0,040	0,14
7	— 0,009	+ 0,008	0,012	0,04
8	+ 0,006	+ 0,004	0,007	0,03
9	— 0,004	— 0,002	0,004	0,01
10	— 0,001	+ 0,004	0,004	0,01
11	— 0,005	— 0,002	0,005	0,02
12	— 0,002	+ 0,001	0,002	0,01

Kurve 32 (a_1)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	— 0,056	— 0,120	0,132	0,63
2	0	+ 0,028	0,028	0,13
3	+ 0,040	— 0,205	0,209	1,00
4	+ 0,023	+ 0,014	0,027	0,13
5	— 0,008	— 0,037	0,038	0,18
6	— 0,002	0	0,002	0,01
7	— 0,019	+ 0,013	0,023	0,11
8	— 0,005	+ 0,004	0,006	0,03
9	+ 0,008	+ 0,001	0,008	0,04
10	— 0,006	— 0,005	0,008	0,04
11	— 0,002	— 0,001	0,002	0,01
12	+ 0,002	— 0,004	0,004	0,02
13	— 0,003	+ 0,006	0,007	0,03
14	+ 0,001	+ 0,003	0,003	0,01
15	0	— 0,001	0,001	0
16	— 0,001	+ 0,002	0,002	0,01

Kurve 33 (e_2)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,041	— 0,418	0,420	1,00
2	— 0,010	— 0,014	0,017	0,04
3	— 0,027	— 0,144	0,146	0,35
4	+ 0,058	— 0,067	0,089	0,21
5	— 0,018	+ 0,036	0,040	0,10
6	— 0,062	+ 0,008	0,063	0,15
7	+ 0,025	+ 0,012	0,027	0,06

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
8	0	+ 0,003	0,003	0,01
9	— 0,001	+ 0,002	0,002	0
10	— 0,006	— 0,001	0,006	0,01
11	— 0,001	— 0,002	0,002	0
12	— 0,002	— 0,004	0,004	0,01

Kurve 34 (c_3)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,392	— 0,920	1,000	1,00
2	— 0,010	+ 0,079	0,080	0,08
3	— 0,126	— 0,240	0,271	0,27
4	— 0,038	+ 0,048	0,061	0,06
5	+ 0,032	+ 0,044	0,054	0,05
6	— 0,001	— 0,010	0,010	0,01
7	+ 0,015	0	0,015	0,02

Kurve 35 (C)

P.T.	p. sin.	q. cos.	$p^2 + q^2$	
1	+ 0,012	+ 0,003	0,012	0,07
2	+ 0,030	+ 0,028	0,041	0,23
3	— 0,032	+ 0,030	0,044	0,25
4	— 0,053	— 0,016	0,055	0,31
5	— 0,047	— 0,172	0,178	1,00
6	— 0,020	— 0,004	0,020	0,11
7	+ 0,029	+ 0,140	0,143	0,80
8	+ 0,002	+ 0,042	0,042	0,23
9	— 0,007	— 0,002	0,007	0,04
10	+ 0,009	— 0,002	0,009	0,05
11	+ 0,009	+ 0,008	0,012	0,07
12	+ 0,006	+ 0,004	0,007	0,04
13	+ 0,009	+ 0,007	0,011	0,06
14	+ 0,010	+ 0,005	0,011	0,06
15	+ 0,010	+ 0,003	0,011	0,06
16	+ 0,009	+ 0,002	0,009	0,05
17	— 0,005	— 0,004	0,006	0,03
18	— 0,004	— 0,019	0,019	0,11
19	0	— 0,006	0,006	0,03
21	+ 0,003	+ 0,007	0,008	0,04
23	+ 0,005	+ 0,004	0,006	0,03

Kurve 36 (Fis)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,034	— 0,009	0,035	0,19
2	+ 0,072	— 0,054	0,090	0,48
3	+ 0,102	— 0,015	0,103	0,55
4	+ 0,130	— 0,136	0,188	1,00
5	+ 0,127	— 0,097	0,160	0,85
6	+ 0,001	— 0,029	0,029	0,15
7	+ 0,042	+ 0,003	0,042	0,22
8	+ 0,001	— 0,069	0,069	0,37
9	— 0,028	+ 0,027	0,039	0,21
10	— 0,015	+ 0,016	0,022	0,12
11	+ 0,006	+ 0,040	0,040	0,21
12	+ 0,012	+ 0,009	0,015	0,08
13	+ 0,023	— 0,001	0,023	0,12
14	— 0,023	+ 0,075	0,078	0,41
15	— 0,012	— 0,008	0,010	0,05
16	— 0,002	+ 0,010	0,010	0,05
17	+ 0,013	+ 0,025	0,028	0,15
18	— 0,003	+ 0,010	0,010	0,05
19	— 0,002	+ 0,007	0,007	0,04
21	+ 0,007	+ 0,006	0,009	0,05
23	— 0,001	0	0,001	0,01

Kurve 37 (c_0)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	— 0,003	+ 0,006	0,007	0,05
2	+ 0,022	+ 0,016	0,027	0,19
3	+ 0,010	+ 0,030	0,032	0,22
4	+ 0,002	— 0,144	0,144	1,00
5	— 0,005	+ 0,008	0,009	0,06
6	— 0,067	— 0,063	0,092	0,64
7	0	+ 0,037	0,037	0,03
8	— 0,030	+ 0,070	0,076	0,53
9	+ 0,007	+ 0,006	0,009	0,06
10	+ 0,032	+ 0,015	0,035	0,24
11	+ 0,019	+ 0,005	0,020	0,14
12	+ 0,015	+ 0,005	0,016	0,11
13	— 0,001	— 0,002	0,002	0,01
14	— 0,003	— 0,002	0,003	0,02
15	— 0,007	+ 0,001	0,007	0,05
16	— 0,007	— 0,001	0,007	0,05
17	— 0,002	0	0,002	0,01
18	— 0,000	+ 0,002	0,002	0,01
19	+ 0,002	— 0,001	0,002	0,01

Kurve 38 (e_0)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	— 0,074	+ 0,063	0,097	0,44
2	+ 0,057	— 0,177	0,186	0,85
3	+ 0,040	— 0,216	0,220	1,00
4	— 0,160	— 0,053	0,169	0,77
5	+ 0,043	— 0,039	0,058	0,26
6	+ 0,083	— 0,058	0,101	0,46
7	+ 0,030	+ 0,026	0,040	0,18
8	+ 0,008	— 0,013	0,015	0,07
9	— 0,019	+ 0,022	0,029	0,13
10	— 0,003	— 0,010	0,010	0,05
11	— 0,009	+ 0,004	0,010	0,05
12	+ 0,001	+ 0,010	0,010	0,05
13	+ 0,004	— 0,004	0,006	0,03
14	— 0,009	+ 0,002	0,009	0,04
15	— 0,005	— 0,004	0,006	0,03
16	+ 0,003	+ 0,003	0,004	0,02
17	— 0,006	— 0,002	0,006	0,03
18	0	0	0	0
19	— 0,004	+ 0,002	0,005	0,02

Kurve 39 (as_0)

P.T.	p. sin.	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,034	+ 0,003	0,034	0,14
2	+ 0,044	— 0,116	0,124	0,50
3	— 0,152	— 0,195	0,247	1,00
4	+ 0,145	— 0,142	0,203	0,82
5	— 0,019	0	0,019	0,08
6	— 0,024	— 0,022	0,033	0,13
7	— 0,013	+ 0,009	0,016	0,06
8	— 0,001	+ 0,013	0,013	0,05
9	+ 0,005	+ 0,013	0,014	0,06
10	+ 0,002	— 0,003	0,004	0,02
11	+ 0,002	+ 0,004	0,005	0,02
12	— 0,003	+ 0	0,003	0,01
13	+ 0,002	0	0,002	0,01
14	— 0,002	— 0,004	0,005	0,02
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	— 0,002	— 0,003	0,004	0,02
18	+ 0,001	+ 0,001	0,002	0,01

Kurve 40 (c_1)

P.T.	p. sin.'	q. cos.	p^2	$+ q^2$
1	+ 0,010	— 0,022	0,024	0,04
2	+ 0,060	+ 0,310	0,316	0,52
3	— 0,014	— 0,608	0,608	1,00
4	+ 0,003	— 0,118	0,118	0,19
5	— 0,126	— 0,324	0,348	0,63
6	+ 0,046	— 0,069	0,083	0,14
7	— 0,023	+ 0,038	0,044	0,07
8	+ 0,052	+ 0,038	0,064	0,11
9	+ 0,021	+ 0,007	0,022	0,04
10	+ 0,022	+ 0,039	0,045	0,08
11	+ 0,008	+ 0,001	0,008	0,01
12	— 0,004	+ 0,008	0,009	0,01
13	+ 0,005	+ 0,012	0,013	0,02
14	+ 0,015	— 0,001	0,015	0,02
15	+ 0,016	+ 0,019	0,025	0,04
16	+ 0,005	+ 0,008	0,009	0,01
17	+ 0,012	+ 0,013	0,018	0,03
18	+ 0,011	+ 0,005	0,012	0,02
19	— 0,001	+ 0,010	0,010	0,02

Anmerkungen.

1. C. Stumpf, Sprachlaute 1926.

2. Über die Leistungen und Fehlerquellen des Verfahrens vgl. auch: Stumpf und von Allesch, Über den Einfluß der Röhrenweite auf die Auslöschung hoher Töne durch Interferenzröhren, Passow und Schaefers Beiträge B. 17. 1921.

3. Bell-System, techn. Journal.

4. Da die Firmen besonderen Wert darauf legen, daß die Tonbildung nicht durch falschen Anblasedruck beeinträchtigt wird, wurden die von den Firmen angegebenen Anblasedrucke genau eingehalten.

1. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. 6. Aufl. 1913.

2. E. Schumann, Physik der Klangfarben. II. Band. (Habilitationsschrift, Univ. Berlin) 1929.

3. C. Stumpf, Sprachlaute. 1926.

4. Siehe E. Schumann a. a. O.

5. Siehe E. Schumann a. a. O.

6. Denn nur unterhalb d_3 sind die geradzahligen Teiltöne nicht oder schwach vertreten.

7. Im Folgenden gelten als Grundlage für den Vergleich die von E. Schumann a. a. O. besprochenen typischen Instrumentalklangstrukturen. Die hier angeführten Nummern der Instrumentalkurven stimmen mit denen der angeführten Arbeit überein.

1. So schreibt z. B. der Orgelbauer Joh. Klais, Bonn, am 7. 1. 20 an Herrn Geheimrat Stumpf: „Ich finde die Orgelflöten viel schöner als die im Orchester, weil erstere vermöge der jedem Ton angepaßten Mensur in den verschiedenen Tonlagen einen viel gleichmäßigeren Charakter behalten, wovon bei einer Orchesterflöte meines Erachtens gar nicht die Rede sein kann."

2. Besonders bei Klängen auf den Grundtönen g_1 bis g_2.

3. C. Stumpf, Sprachlaute 1926, S. 384.

4. Gegebenenfalls — wie bei der Rohrflöte — unter Benutzung des den Resonanzkörper der Hauptstimme erregenden Anblasestromes.

Lebenslauf.

Ich wurde am 31. Mai 1896 in Hohensalza als Sohn des Oberingenieurs Ernst Winkhaus geboren. 1902 bis 1913 besuchte ich die Vorschule und das Realgymnasium in Rathenow und war sodann in einem industriellen Betriebe praktisch tätig. Bei Kriegsausbruch meldete ich mich als Kriegsfreiwilliger und war von 1914 bis zum Kriegsschluß mit Unterbrechungen, die durch Verwundungen gegeben waren, bei verschiedenen Regimentern an der Front.

Nach dem Kriege arbeitete ich in der Industrie und später bei einer militärischen Dienststelle. Sodann studierte ich an der Universität Berlin Physik, Musikwissenschaft und Philosophie. Nach Ablegen des Doktor-Examens beabsichtige ich, diese Studien besonders in Physik fortzusetzen.